

ANDERSON SCHMITT

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE DIRETRIZES DE TRAÇADOS  
GEOMÉTRICOS DE OBRAS LINEARES UTILIZANDO ANÁLISE  
MULTICRITÉRIO EM SIG: ESTUDO DE CASO EM TRECHO  
FERROVIÁRIO**

Florianópolis

2016





Anderson Schmitt

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE DIRETRIZES DE TRAÇADOS  
GEOMÉTRICOS DE OBRAS LINEARES UTILIZANDO ANÁLISE  
MULTICRITÉRIO EM SIG: ESTUDO DE CASO EM TRECHO  
FERROVIÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido  
ao Departamento de Engenharia Civil da Uni-  
versidade Federal de Santa Catarina para ob-  
tenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Hering Co-  
elho

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schmitt, Anderson  
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE DIRETRIZES DE TRAÇADOS  
GEOMÉTRICOS DE OBRAS LINEARES UTILIZANDO ANÁLISE  
MULTICRITÉRIO EM SIG : ESTUDO DE CASO EM TRECHO FERROVIÁRIO  
/ Anderson Schmitt ; orientador, Alexandre Hering Coelho -  
Florianópolis, SC, 2016.  
119 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Diretriz de traçado linear. 3.  
Análise Multicritério. 4. Análise de Sensibilidade. 5.  
Sistema de Informação Geográfica. I. Coelho, Alexandre  
Hering. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

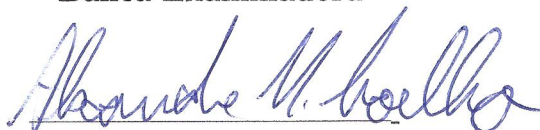
ANDERSON SCHMITT

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE DIRETRIZES DE TRAÇADOS GEOMÉTRICOS DE  
OBRAS LINEARES UTILIZANDO ANÁLISE MULTICRITÉRIO EM SIG:  
ESTUDO DE CASO EM TRECHO FERROVIÁRIO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil, e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 23 de novembro de 2016.

**Banca Examinadora**



Prof. Dr. Alexandre Hering Coelho

Prof. Dr. João Victor Staub de Melo

Dr. Edésio Elias Lopes

Florianópolis

2016

## AGRADECIMENTOS

À minha família, meu pai Afonso, minha mãe Isolete e minha irmã Larissa, por todo amor, carinho e por me darem condições e estrutura para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

Ao meu orientador, professor Alexandre, pela paciência, pela vontade de ensinar e por me motivar sempre no aprendizado de novas ferramentas.

A Edésio Elias Lopes, pelas contribuições e por disponibilizar todos os arquivos e dados do estudo para que esse trabalho pudesse ser feito.

Aos amigos do LabFSG e do LabTrans, por sempre me orientarem nas mais diversas dúvidas que surgiram durante minha formação e por ampliarem minha visão e conhecimento em áreas muito importantes da engenharia.

A todas as pessoas que fizeram parte da minha formação durante esses anos, aos amigos que fiz no intercâmbio, no CALEC, no ENEC, na Betonada e nas outras atividades as quais tive o prazer de fazer parte. Atividades essas que adicionaram muitos conhecimentos e experiências que não se aprendem em sala de aula.

## RESUMO

No cenário atual, o planejamento de obras de grande porte precisa levar em consideração restrições ambientais, sociais e legislativas. Essas restrições juntamente com orçamentos limitados fazem com que um bom planejamento seja um aspecto indispensável da viabilidade de um projeto. O desenvolvimento de novas tecnologias computacionais torna o processo de planejamento de obras lineares mais ágil. Este trabalho propõe fazer a análise de sensibilidade de uma diretriz ferroviária traçada na região do Vale do Itajaí no estado de Santa Catarina. O método foi baseado no procedimento proposto por Lopes (2015), incluindo a variação do peso de parâmetros ambientais, socioeconômicos e tecnológicos, utilizando o uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Análise Multicritério. Foram utilizados métodos de reconhecimento de similaridades para quantificar a semelhança entre o traçado original e os novos traçados gerados a partir da variação dos pesos. A metodologia foi implementada em um script, possibilitando gerar no total 6101 variações, que podem ser consideradas como 6101 diretrizes de traçados diferentes. A partir dos dados das variações foram gerados gráficos e mapas para auxiliar a interpretação dos dados. Os dados obtidos nesse trabalho auxiliam os tomadores de decisões na melhor escolha dos pesos dos parâmetros. O tomador de decisão pode visualizar a variação da diretriz e ter uma melhor compreensão das mudanças com uma possível alteração nos pesos, fazendo com que ele possa escolher os pesos dos parâmetros de forma direcionada para a área de estudo.

Palavras-chave: Diretriz de traçado linear; Análise Multicritério; Método de Análise Hierárquica; Análise de Sensibilidade; Sistema de Informação Geográfica;

## ABSTRACT

In the current scenario, the planning of large projects needs to consider environmental, social and legislative constraints. These constraints coupled with limited budgets make a good planning to be an indispensable aspect of project viability. The development of new computational technologies turns the process of planning linear works more agile. This paper proposes to perform a sensibility analysis of a railroad guideline traced in Vale do Itajaí region in Santa Catarina state. The method was based on the procedures proposed by Lopes (2015), including the variation in the weight of environmental, socioeconomic and technological parameters, using Geographic Information System (GIS) and Multi-Criteria Analysis. Similarity recognition methods were used to quantify the similarity between the original guideline and the new traces produced from variation of the weights. The method was implanted in a script. A total of 6101 variations were made, which can be considered as 6101 different traced guidelines. Graphs and maps were generated to support data interpretation. The results show that, in some cases, a slight variation on the weights of the parameters can imply in a large difference in the traced guideline, supporting the decision makers to choose the weights of the parameters.

Key-words: Design guideline; Multi-Criteria Analysis; Analytic Hierarchy Process; Sensibility Analysis; Geographic Information System.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Obras lineares . . . . .	17
Figura 2 - Modelagem de um Sistema em SIG . . . . .	22
Figura 3 - Configuração básica de um SIG . . . . .	23
Figura 4 - Comparação entre o modelo raster (a) e vetorial (b) . . . . .	24
Figura 5 - Exemplo de álgebra dos mapas: soma de duas camadas resultando em uma nova camada de dados . . . . .	26
Figura 6 - Superfícies de custo com a representação do local do incêndio (ponto vermelho) e das centrais de bombeiros (pontos azuis) . . . . .	27
Figura 7 - Definição do caminho de mínimo custo . . . . .	28
Figura 8 - Distância Discreta de Fréchet . . . . .	29
Figura 9 - Processo de cálculo da Distância Modificada de Hausdorff . . . . .	30
Figura 10 -Etapas do AHP . . . . .	32
Figura 11 -Fluxograma do método de trabalho de Lopes(2015) . . . . .	38
Figura 12 -Restrições e diretriz de traçado ferroviário sobrepostos . . . . .	38
Figura 13 -Hierarquização do método AHP proposto por Lopes (2015) . . . . .	39
Figura 14 -Camada resultante e melhor diretriz de traçado . . . . .	40
Figura 15 -Visualização de um modelo em Quantm . . . . .	41
Figura 16 -Etapas do planejamento e da obtenção de alternativas ao traçado utilizando o Quantm . . . . .	41
Figura 17 -Área de estudo . . . . .	43
Figura 18 -Fluxograma do método do trabalho . . . . .	45
Figura 19 -Exemplo de camada geográfica classificada - Rodovias principais . . . . .	47
Figura 20 -Exemplo de estruturação do AHP . . . . .	47
Figura 21 -Camada resultado do AHP na região de estudo . . . . .	52
Figura 22 -Diretriz de referência . . . . .	52
Figura 23 -Fluxograma do método de variação do peso dos parâmetros e comparação das diretrizes . . . . .	53
Figura 24 -Comparação de diretriz e seus valores de DDF e DMH . . . . .	54
Figura 25 -Banco de dados gerado na Etapa 3 . . . . .	55
Figura 26 -Exemplo de gráfico . . . . .	55
Figura 27 -Seleção no banco de dados das diretriz à serem exportadas . . . . .	56
Figura 28 -Exemplo de mapa produzido . . . . .	57
Figura 29 -Parâmetros socioeconômicos presentes na área de estudo . . . . .	62
Figura 30 -Mapa - rodovias principais x rodovias secundárias . . . . .	64
Figura 31 -Mapa - rodovias secundárias x ferrovias . . . . .	65
Figura 32 -Gráfico de DDF - rodovias principais x ferrovias . . . . .	66
Figura 33 -Gráfico de DDF - rios principais x rios Secundários . . . . .	67
Figura 34 -Gráfico de DDF - rios secundários x áreas inundáveis . . . . .	67
Figura 35 -Mapa - rios secundários x áreas inundáveis . . . . .	68
Figura 36 -Mapa - declividade x área urbana . . . . .	69
Figura 37 -Tendência da diretriz na variação negativa do parâmetro declividade . . . . .	70
Figura 38 -Mapa - hidrografia x acessos . . . . .	71
Figura 39 -Mapa - hidrografia x áreas urbanas . . . . .	72
Figura 40 -Mapa - acessos x áreas urbanas . . . . .	73
Figura 41 -Camada área urbana . . . . .	74

Figura 42 -Camadas rodovias principais, declividade e rios principais . . . . .	74
Figura 43 -Área de maior variação (A) e área de menor variação (B) . . . . .	75
Figura 44 -Mapa - técnico x socioeconômico . . . . .	76
Figura 45 -Mapa - ambiental x socioeconômico . . . . .	77
Figura 46 -Mapa - técnico x ambiental . . . . .	78
Figura 47 -Mapa - rodovias principais x rodovias secundárias . . . . .	84
Figura 48 -Mapa - rodovias principais x ferrovias . . . . .	85
Figura 49 -Mapa - rodovias secundárias x ferrovias . . . . .	86
Figura 50 -Mapa - rios principais x rios secundários . . . . .	87
Figura 51 -Mapa - rios principais x áreas inundáveis . . . . .	88
Figura 52 -Mapa - rios secundários x áreas inundáveis . . . . .	89
Figura 53 -Mapa - áreas protegidas x distanciamentos legais . . . . .	90
Figura 54 -Mapa - áreas protegidas x áreas prioritárias para conservação . . . . .	91
Figura 55 -Mapa - áreas protegidas x assentamento rural . . . . .	92
Figura 56 -Mapa - distanciamentos legais x áreas prioritárias para conservação . . . . .	93
Figura 57 -Mapa - distanciamentos legais x assentamento rural . . . . .	94
Figura 58 -Mapa - declividade x hidrografia . . . . .	95
Figura 59 -Mapa - declividade x acessos . . . . .	96
Figura 60 -Mapa - declividade x áreas urbanas . . . . .	97
Figura 61 -Mapa - declividade x solos . . . . .	98
Figura 62 -Mapa - hidrografia x acessos . . . . .	99
Figura 63 -Mapa - hidrografia x áreas urbanas . . . . .	100
Figura 64 -Mapa - hidrografia x solos . . . . .	101
Figura 65 -Mapa - acessos x áreas urbanas . . . . .	102
Figura 66 -Mapa - acessos x solos . . . . .	103
Figura 67 -Mapa - áreas urbanas x solos . . . . .	104
Figura 68 -Mapa - técnico x ambiental . . . . .	105
Figura 69 -Mapa - técnico x socioeconômico . . . . .	106
Figura 70 -Mapa - ambiental x socioeconômico . . . . .	107
Figura 71 -Camada - unidade de conservação de proteção integral . . . . .	113
Figura 72 -Camada - distanciamento de terras indígenas . . . . .	113
Figura 73 -Camada - distanciamento de terras quilombolas . . . . .	113
Figura 74 -Camada - zona de amortecimento de unidade de conservação . . . . .	114
Figura 75 -Camada - área de preservação permanente . . . . .	114
Figura 76 -Camada - áreas prioritárias para conservação . . . . .	114
Figura 77 -Camada - assentamento rural . . . . .	115
Figura 78 -Camada - rodovias principais . . . . .	115
Figura 79 -Camada - rodovias secundárias . . . . .	115
Figura 80 -Camada - ferrovias . . . . .	116
Figura 81 -Camada - rios Principais . . . . .	116
Figura 82 -Camada - rios Secundários . . . . .	116
Figura 83 -Camada - áreas inundáveis . . . . .	117
Figura 84 -Camada - áreas Urbana . . . . .	117
Figura 85 -Camada - declividade . . . . .	117
Figura 86 -Camada - geotécnica . . . . .	118
Figura 87 -Camada - soja . . . . .	118
Figura 88 -Camada - milho . . . . .	118
Figura 89 -Camada - suínos . . . . .	119



Figura 90 -Camada - bovinos . . . . .	119
Figura 91 -Camada - galinhas . . . . .	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - A escala fundamental de Saaty . . . . .	33
Tabela 2 - Exemplo de matriz comparação . . . . .	33
Tabela 3 - Dados geográficos utilizados no estudo . . . . .	44
Tabela 4 - Matriz do peso dos parâmetros de nível 2 . . . . .	48
Tabela 5 - Matriz do peso dos parâmetros de nível 1 . . . . .	48
Tabela 6 - Cálculo da matriz normalizada . . . . .	48
Tabela 7 - Cálculo do auto vetor principal . . . . .	49
Tabela 8 - Valor do RI . . . . .	49
Tabela 9 - Valores da contribuição dos parâmetros de nível 2 . . . . .	50
Tabela 10 - Valores da contribuição dos parâmetros de nível 2 . . . . .	50
Tabela 11 - Síntese dos pesos dos parâmetros . . . . .	50
Tabela 12 - Contribuição de cada parâmetro no resultado final . . . . .	51
Tabela 13 - Matriz com os pesos originais . . . . .	53
Tabela 14 - Matriz com os pesos modificados . . . . .	53
Tabela 15 - Parâmetros que provocaram as maiores sensibilidades . . . . .	58
Tabela 16 - Número de ocorrências dos parâmetros principais . . . . .	59
Tabela 17 - Número de ocorrências dos parâmetros secundários . . . . .	59
Tabela 18 - Parâmetros ambientais e suas contribuições . . . . .	60
Tabela 19 - Parâmetros socioeconômicos e suas contribuições . . . . .	61
Tabela 20 - Parâmetros técnicos e suas contribuições . . . . .	63
Tabela 21 - Parâmetros resultados e suas contribuições . . . . .	75

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1	OBRAS LINEARES	17
2.1.1	Estudo de diretriz de traçado	18
2.2	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	22
2.2.1	Modelos de representação	24
2.2.2	Álgebra de mapas	25
2.2.3	Caminho de mínimo custo	26
2.2.4	Métodos de comparação de poligonais	28
2.3	ANÁLISE MULTICRITÉRIO	30
2.3.1	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	31
2.3.2	Análise de sensibilidade	34
2.4	INTEGRAÇÃO SIG/AMC	35
2.4.1	Definição de traçado de obras lineares	36
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>MÉTODO E FERRAMENTAS</b>	<b>45</b>
4.1	ETAPA 1 – Levantamento dos dados da área de estudo	46
4.2	ETAPA 2 – Obtenção da diretriz de referência	47
4.3	ETAPA 3 – Variação dos pesos dos parâmetros	53
4.4	ETAPA 4 – Análise dos resultados	55
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>58</b>
5.1	Parâmetros Ambientais	60
5.2	Parâmetros Socioeconômicos	61
5.3	Parâmetros Técnicos	62
5.3.1	Nível 1	63
5.3.2	Nível 2	68
5.4	Parâmetros resultado	75
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>80</b>
<b>A</b>	<b>Mapas</b>	<b>84</b>
<b>B</b>	<b>Script</b>	<b>108</b>
<b>C</b>	<b>Camadas Geográficas</b>	<b>113</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O principal objetivo do planejamento de obras lineares é encontrar um traçado com o menor custo de implantação conciliando todos os requisitos, condições e restrições nos âmbitos ambiental, social e político.

De acordo com [Gipps, Gu e Barnett \(2001\)](#), a solução mais barata de traçado seria seguir a superfície natural do terreno, no entanto isso é frequentemente impossível, já que o alinhamento está sujeito a muitas restrições. Devem ser garantidas inúmeras questões ambientais para que a obra não reduza a biodiversidade ou degrade o meio ambiente. O problema se torna mais complexo em ambientes urbanos ou semi-urbanos, onde a construção da obra também é influenciada pela localização dos serviços, estradas e edifícios existentes. A complexidade do planejamento do traçado de uma obra linear de alta qualidade e baixo custo se torna uma arte de grande dificuldade.

[Gipps, Gu e Barnett \(2001\)](#) complementam que o primeiro passo na produção de traçados de alta qualidade depende da obtenção de dados adequados sobre o terreno, geologia, rios, planícies, estradas existentes, entre outros. Além disso, há questões como o uso e propriedade da terra, o impacto social, econômico e a identificação de áreas ambientalmente sensíveis. Dependendo do comprimento do alinhamento e da complexidade do ambiente físico e social, pode-se levar muitos meses para coletar os dados.

Por isso, muitas vezes, o número de rotas estudadas é limitado, pois não há tempo nem recursos suficientes na fase de planejamento para investigar e calcular mais do que algumas rotas para o projeto final. Segundo [Lopes \(2015\)](#), muitas vezes, ainda, a definição do trajeto é definida por análises sem embasamento técnico, o que pode criar problemas por favorecer uma região específica em detrimento de outra, considerando que um sistema viário novo tende a gerar um vetor de crescimento econômico.

O desenvolvimento de novas tecnologias e o suporte propiciado pelos computadores fez com que o processo de planejamento de obras lineares fosse agilizado. Surgiram as plataformas CAD que facilitaram o processo. Ainda assim, o processo de definição do traçado era lento e limitado em termos de número de alinhamentos que podiam ser avaliados pelos tomadores de decisão. Com o tempo novas técnicas de definição de traçados lineares surgiram, trazendo principalmente o apoio dos Sistemas de Informação Geográficas (SIG). É possível, por exemplo, com o uso de tecnologias de SIG espacializar e analisar

os requisitos, condições e restrições presentes no planejamento de uma obra linear.

Com a automatização computacional dos processos e auxílio de métodos de tomada de decisão é possível analisar e gerar um maior número de rotas em um menor tempo, sendo possível visualizar e ter uma melhor compreensão das mudanças, vantagens e desvantagens das alternativas de traçado na área de implantação da obra linear.

[Lopes \(2015\)](#) desenvolveu um método para geração de diretrizes de traçado de obras lineares a partir da hierarquização de parâmetros de restrições e possibilidades agrupados em relação aos grupos ambiental, técnico e socioeconômico. Os parâmetros são representados por dados georreferenciados, hierarquizados e ponderados em função do processo de análise multicritério. O método desenvolvido por [Lopes \(2015\)](#) resulta em um mapa com áreas de melhores possibilidades para definição da diretriz de traçado que foi utilizado como base para a geração automática da diretriz.

Conforme [Lopes \(2015\)](#), os pesos dos parâmetros utilizados na análise multicritério, podem ser variados, permitindo, assim, a análise de sensibilidade da diretriz do traçado. Essa análise possibilita a obtenção de várias propostas de diretriz, possibilitando a geração de um maior número de alternativas de traçado bem como a avaliação e a identificação de possíveis pesos ideais.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Visualizar e analisar a sensibilidade da diretriz de traçado linear a partir da variação dos parâmetros técnico, socioeconômicos e ambientais propostos na metodologia de [Lopes \(2015\)](#) baseada em análise multicritério em SIG.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- (a) Estudar e compreender a influência da estrutura do Método de Análise Hierárquica (AHP) proposto por [Lopes \(2015\)](#) na interferência do resultado da diretriz do traçado;
- (b) Estudar métodos de comparação das poligonais;
- (c) Adaptar o procedimento de [Lopes \(2015\)](#) de forma a incluir variações nos dados de

- 
- entrada (pesos dos parâmetros), executar e extrair resultados (diretrizes);
- (d) Visualizar o comportamento da diretriz do traçado linear e a resposta à variação dos pesos dos parâmetros;
  - (e) Identificar os parâmetros que causam maior e menor sensibilidade na diretriz;
  - (f) Verificar uma possível simplificação na estrutura do AHP na área estudada;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 OBRAS LINEARES

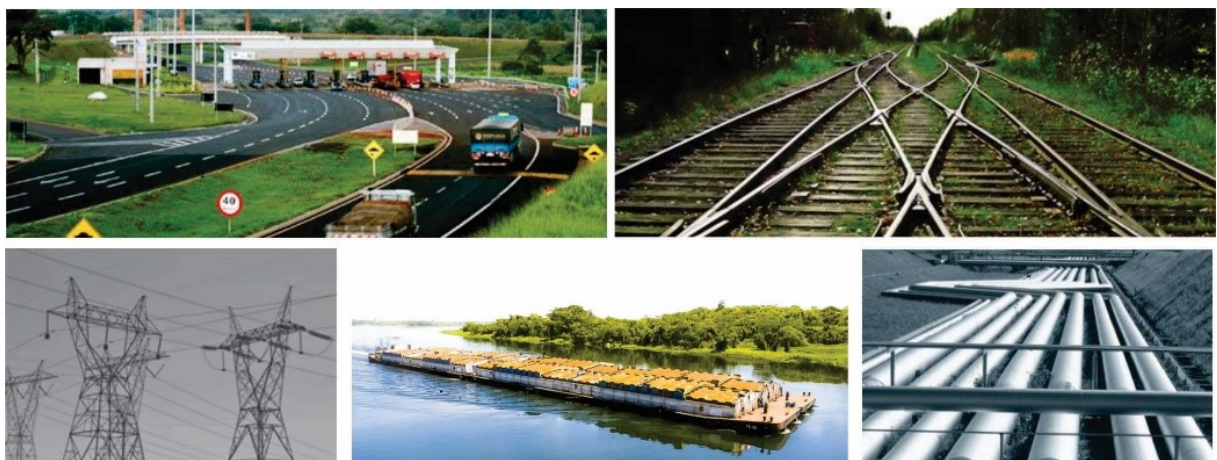
Segundo [Soares \(2009\)](#), são denominadas obras lineares aquelas que possuem uma de suas três dimensões com extensão muito maior do que as outras duas. Esse tipo de obra é mais comumente relacionado à infraestrutura de transportes e costuma ser um empreendimento de porte considerável.

Para [Dodde \(2012\)](#), obras lineares têm a característica de estarem presentes por grandes extensões em todo o mundo e alcançarem longas distâncias apesar de ocuparem uma faixa territorial relativamente estreita nos locais que passam. Geralmente os empreendimentos lineares representam um sistema de transporte, seja de energia, de passageiros ou de produtos comercializáveis.

[Dodde \(2012\)](#) afirma ainda que, a necessidade de transportar materiais e energia a grandes distâncias favoreceu o surgimento dessa classe de empreendimentos, afetando de diversas maneiras o meio socioambiental em diferentes regiões.

São exemplos de obras lineares (Figura 1) as rodovias, ferrovias, linhas de transmissão, hidrovias (canais) e dutovias.

Figura 1: Obras lineares



Fonte: Adaptado de [ANTT \(2016\)](#), [ANEEL \(2016\)](#) e [ANTAQ \(2016\)](#)

### 2.1.1 Estudo de diretriz de traçado

Segundo [Lee \(2008\)](#), diretriz de traçado é um itinerário, compreendendo uma ampla faixa de terreno, ao longo da qual se presume que possa ser lançado o traçado. O mesmo autor complementa que, para a definição da diretriz de traçado devem ser realizados processos de reconhecimento com o objetivo de detalhar a configuração ou forma da região situada entre os pontos de origem e destino da obra, permitindo, assim, identificar e assinalar características de interesse.

Conforme [Eletrobrás \(1997\)](#) a diretriz de traçado das redes de distribuição de energia, deve passar obrigatoriamente pelos locais de implantação das subestações, pontos obrigatórios e de mudança de direção. A base de dados necessária deve conter informações sobre:

- (a) caracterização do clima e das condições meteorológicas da área de estudo;
- (b) geologia, geomorfologia, topográfica e solos;
- (c) recursos hídricos e usos da água;
- (d) recursos minerais;
- (e) uso e ocupação do solo;
- (f) organização social e territorial;
- (g) patrimônio cultural e natural, áreas protegidas, ecossistemas;
- (h) áreas de interesse estratégico;
- (i) localização da infraestrutura (rodovias, ferrovias, aeroportos); e
- (j) terras indígenas

Já para os estudos da diretriz de traçado das dutovias, [Petrobras \(2003\)](#) diz que devem ser obtidos dados de:

- (a) cursos d'água;
- (b) divisas municipais, distritais e estaduais;
- (c) reservatórios;



- (d) rodovias federais; rodovias estaduais e ferrovias;
- (e) cidades;
- (f) pistas de pouso;
- (g) linhas de energia elétrica;
- (h) topografia;
- (i) áreas de agricultura ou pastagem;
- (j) áreas ecologicamente sensíveis nos seus diversos níveis;
- (k) outras informações de interesse às atividades de implantação.

Com relação aos os estudos de traçado ferroviário e rodoviário, conforme a Instrução de Serviço Ferroviário 205 - ISF-205 ([DNIT, 2015](#)) e a Instrução de Serviço 207 - IS-207 ([DNIT, 2006](#)), eles devem ser executados em duas fases: Fase Preliminar e Fase Definitiva. A fase Preliminar corresponde à coleta, compilação e análise de dados e elementos disponíveis, fornecendo, assim, os elementos e dados relativos à área em estudo. As Instruções listam os dados e documentos a serem coletados e compilados:

- (a) topografia da região (plana, ondulada, montanhosa);
- (b) dados geológicos e/ou geotécnico (tipos de solos, ocorrências de materiais, cobertura vegetal);
- (c) dados climáticos e fluviométricos (rios, lagoas, quedas d'água);
- (d) áreas com restrições ambientais (reservas ecológicas, áreas indígenas, sítios arqueológicos e outros);
- (e) uso do solo, incluindo ocupações urbanas, instalações;
- (f) localização de linhas de transmissão de energia, localização e natureza de outras obras dos serviços públicos (tubulações de águas pluviais, adutoras), entre outros.

Os dados citados podem ser obtidos de diversas formas, dependendo das características da região e dos recursos disponíveis, por meio de exame de mapas e cartas, inspeção

e levantamento topográfico in loco, sobrevoo da região, exame de fotografias aéreas, entre outras formas.

Após a etapa de coleta de dados é feito a identificação e estudo das alternativas de diretrizes de traçado. Conforme [DNIT \(2006\)](#), nessa etapa devem ser determinadas as principais condicionantes existentes, projetadas ou planejadas, sejam relativas ao uso do solo, a redes de serviços públicos, aos controles geográficos ou geotécnicos.

[DNIT \(2006\)](#) diz que, as alternativas de traçado, inicialmente estabelecidas, deverão ser comparadas entre si, levando em consideração os custos preliminares de implantação, estimativa do volume de terraplenagem, quantidade e extensão de obras de arte especiais e túneis, e as características técnicas de cada alternativa. Em consequência dessa avaliação preliminar deve ser possível reduzir as alternativas concebidas, deixando um número menor de soluções básicas para serem avaliadas e comparadas com mais detalhamento na fase seguinte.

Ja a Fase Definitiva abrange a análise e avaliação das alternativas e a definição de suas concepções geométricas. Nessa fase é feita a seleção da alternativa de traçado, onde deve ser considerada a análise da compatibilidade técnica das alternativas com os objetivos do projeto, e a avaliação de suas implicações econômicas. Conforme [DNIT \(2006\)](#) e [DNIT \(2015\)](#), os seguintes aspectos devem ser comparados e analisados entre as alternativas propostas:

- (a) Geologia e geotécnica: determinar zonas de solos compressíveis e trechos alternativos de melhores características, zonas de solos com maior instabilidade quanto a cortes, assim como as soluções técnicas necessárias;
- (b) Movimentação de terra: determinar a movimentação dos volumes de terraplenagem necessário para cada alternativa, de modo a ajustar as necessidades de empréstimos e bota-foras e a disponibilidade de áreas para tal, levando ainda em conta os planos de urbanização e paisagismo existentes;
- (c) Hidrologia e drenagem: definir a concepção do sistema de drenagem principal, compreendendo a configuração e função de sarjetas, valetas, bueiros transversais e longitudinais, pontes e outros dispositivos de captação e escoamento das águas pluviais;
- (d) Obras de arte especiais: definir as necessidades de estruturas, tais como, pontes, viadutos, passarelas, muros de arrimo de maior porte, em função dos dados geotécnicos,

hidrológicos e geométricos disponíveis;

- (e) Faixa de domínio: estimar o custo de desapropriação da faixa de domínio;
- (f) Estudos ambientais: relacionar as características físicas das obras às do meio ambiente; identificar os segmentos críticos no que tange aos impactos ambientais significativos e as respectivas medidas mitigadoras; identificar reservas indígenas, quilombolas, aglomerados urbanos, sítios históricos e outras áreas de restrição ou especialmente protegidas;
- (g) Plano operacional e demanda: determinar o funcionamento operacional da obra, sua integração com o restante do sistema viário, bem como de operação de interseções, ramais, projeções dos volumes de tráfego e outras informações básicas relativas ao modo de funcionamento;
- (h) Estimativa preliminar de custos: estimar os custos levando em consideração os outros aspectos analisados, como também o custo da superestrutura e outros itens necessários.

Nota-se que, não importando o tipo de obra linear, deve-se realizar a análise integrada dos dados e suas interações, de forma a obter-se um quadro referencial da área de estudo, que irá subsidiar a seleção da diretriz. Devem ser considerados aspectos socioambientais, técnicos e restrições referentes a cada tipo de obra. A definição do traçado deve buscar a minimização do custo total e dos impactos sócio-ambientais causados por sua implantação.

Pode-se concluir que o reconhecimento da superfície, ou seja, da área de estudo é de extrema importância para a definição do traçado. A escolha do melhor traçado envolve várias informações de diversas áreas do conhecimento, como também de diversas fontes e requer a análise de uma grande quantidade de informações.

Levando isso em consideração, [Costa, Costa e Vasconcellos \(2008\)](#) dizem que o estudo do traçado pode contar com a capacidade de análise espacial, consulta e visualização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), para que profissionais das áreas técnicas, gerenciais e administrativas das empresas e órgãos envolvidos, sem a ida ao local de fato, possam analisar e tomar decisões sobre o projeto.

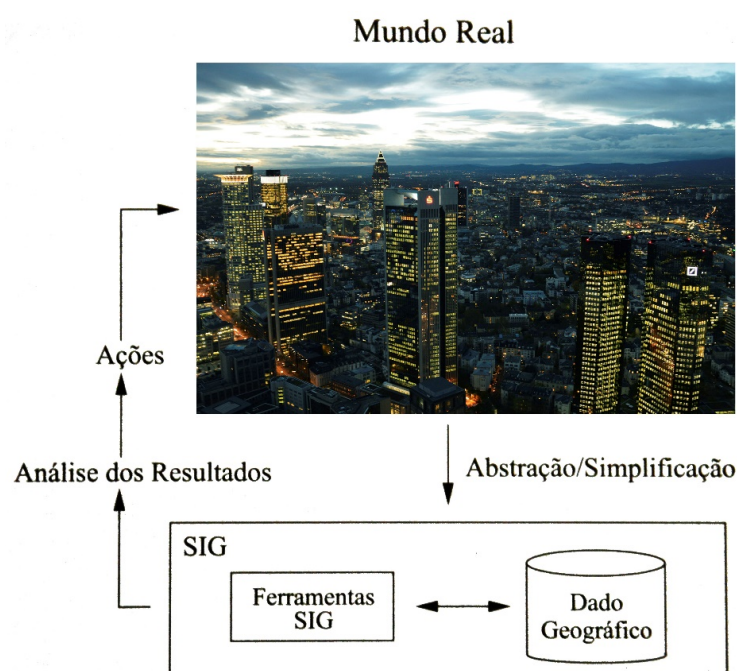
## 2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Segundo Câmara et al. (1996), Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) são sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos. Sendo que a maior característica de um SIG é a capacidade de armazenar, além dos atributos descritivos dos dados geográficos, suas geometrias.

O mesmo autor cita que outra importante característica do SIG é inserir e integrar numa mesma base de dados várias informações espaciais de diferentes fontes. Podendo, essas informações, serem de várias áreas do conhecimento, permitindo a combinação destas para a obtenção de análises multidisciplinares. Portanto, a utilização de SIGs facilita a integração de dados coletados de fontes heterogêneas, de forma transparente ao usuário final.

Miranda (2010) exemplifica o SIG como um sistema em que a realidade é representada (modelada) como uma série de elementos geográficos definidos de acordo com dois atributos de dados (Figura 2). O elemento de dado geográfico é usado para providenciar uma referência para o elemento de dado atributo. Por exemplo, as coordenadas (x, y) de localização de cota de elevação são um atributo geográfico usado para providenciar uma referência para locais de elevação.

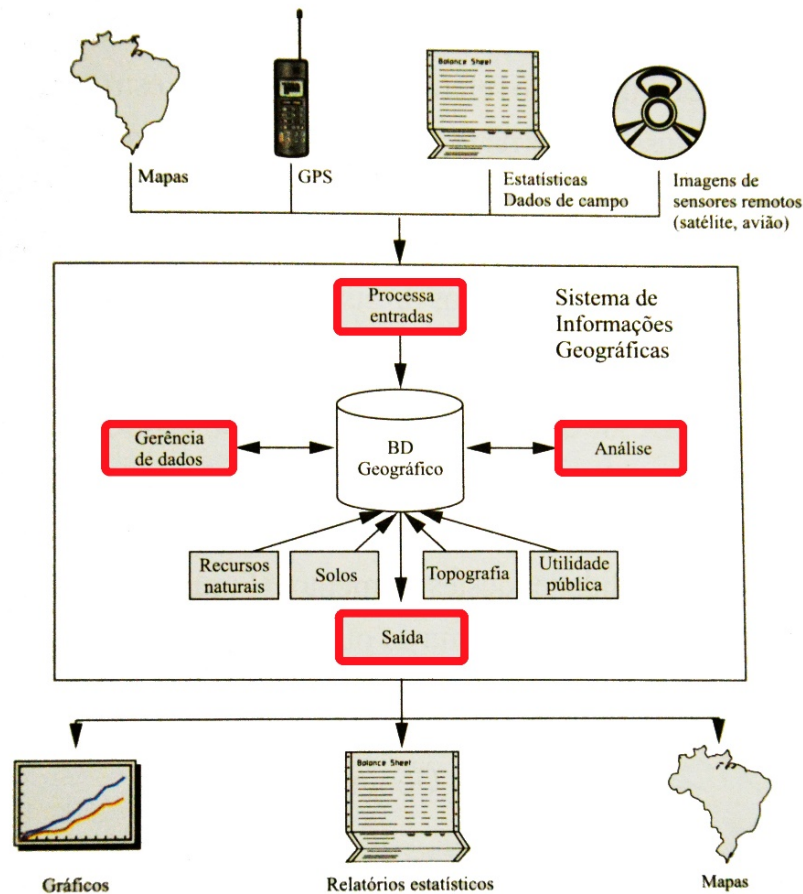
Figura 2: Modelagem de um Sistema em SIG



Fonte: Adaptado de MIRANDA (2010)

Segundo [Miranda \(2010\)](#) um sistema em SIG pode ser subdividido em quatro subsistemas (Figura 3):

Figura 3: Configuração básica de um SIG



Fonte: Adaptado de [MIRANDA \(2010\)](#)

- (a) entrada: engloba funções de coleta de dados espaciais e não espaciais de várias fontes, podendo ser feito por meio de mapas existentes, coletas em campo, satélite, aeronaves, GPS, entre outros. Os dados são recursos cruciais, sendo que a qualidade e a precisão da coleta influem diretamente no resultado final da análise;
- (b) gerência dos dados: função de organização, recuperação, atualização e edição dos dados de entrada, formando assim a base de dados do sistema. Geralmente os dados geográficos assumem três formas distintas: ponto, linha ou área. Já o dado de atributo pode ser qualitativo ou quantitativo;
- (c) análise: tem por função agregar e desagregar dados, estimar parâmetros e restrições

e realizar funções de modelagem, como, por exemplo, medir, calcular, comparar e contrastar padrões nos dados; e

- (d) saída: tem por função mostrar toda a base de dados ou parte dela em forma de tabela, gráfico ou mapa. Ou seja, a maneira como os dados e resultados das análises são apresentados aos usuários.

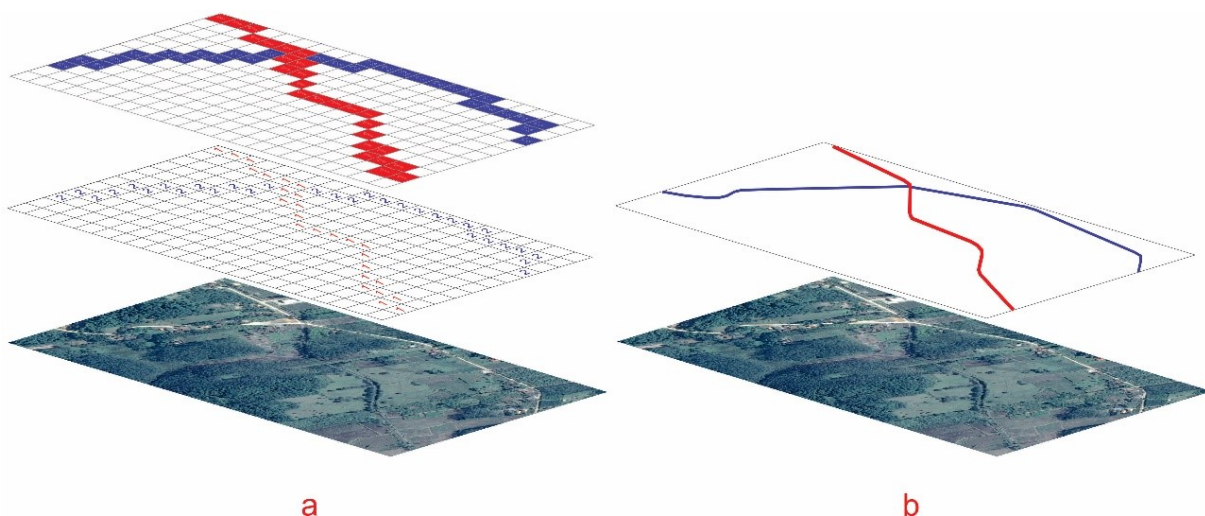
### 2.2.1 Modelos de representação

Segundo [Olaya \(2011\)](#), os modelos de representação espacial oferecem uma maneira de representar o espaço e seus atributos, com base neles é possível reduzir as informações em um conjunto finito de elementos de tal modo que esses elementos sirvam como um modelo da realidade.

Estão consolidados dois tipos de modelos de representação espacial: modelo de representação raster e modelo de representação vetorial ([Figura 4](#)).

Conforme [Olaya \(2011\)](#), o modelo raster se caracteriza por dividir, seguindo um padrão, a área de estudo de forma sistemática em uma série de unidade mínimas (células ou pixels). As células ocupam todo o espaço e não se sobrepõem, podendo carregar informações que a descrevem. Cada célula pode, por exemplo, conter uma informação numérica que pode ser convertida em um valor de cor pré-definido, gerando, assim, uma imagem.

Figura 4: Comparação entre o modelo raster (a) e vetorial (b)



Fonte: Adaptado de [OLAYA \(2011\)](#)

A precisão do modelo *raster* é definida pelo tamanho de célula ou pixel, também

conhecido como resolução. Células de maior tamanho implicam em uma resolução menor, enquanto que células de menor tamanho significam uma resolução maior. Assim, o modelo raster possui sua precisão limitada pelo tamanho de suas células, quanto maior o tamanho da célula, menor a precisão da informação, e quanto menor a célula, maior a base de dados resultante.

Já o modelo vetorial, segundo [Olaya \(2011\)](#), se diferencia por não possuir unidades fundamentais que dividem a área estudada, assim, a variedade e características dos elementos são representadas por formas geométricas, como pontos, linhas e polígonos. Ou seja, o mundo real é dividido em elementos de geometria de pontos, linhas ou áreas, permitindo que todas as posições, comprimentos e dimensões possam ser definidos exatamente.

### 2.2.2 Álgebra de mapas

Segundo [Heywood, Cornelius e Carver \(2006\)](#), a análise dos dados é a etapa que resulta em novas informações que irão auxiliar na tomada de decisão do usuário e onde é possível visualizar algumas respostas para os problemas que devem ser resolvidos.

[Heywood, Cornelius e Carver \(2006\)](#) dizem que, entre as variadas formas de análise de dados, a capacidade de integrar dados de duas ou mais fontes usando sobreposição do mapa é uma das funções chave da análise em SIG. Usando SIG é possível usar camadas de mapas temáticos diferentes da mesma área e sobrepô-las para formar uma nova camada. Esta técnica de análise é chamada de álgebra de mapas.

Utilizando a álgebra de mapas as camadas de dados *raster* podem ser adicionadas, subtraídas, multiplicadas ou divididas para produzir novas camadas. Ou seja, as operações matemáticas são realizadas sobre os valores das células individuais a partir de duas ou mais camadas de entrada para produzir um valor de saída, como pode ser visto na Figura 5.

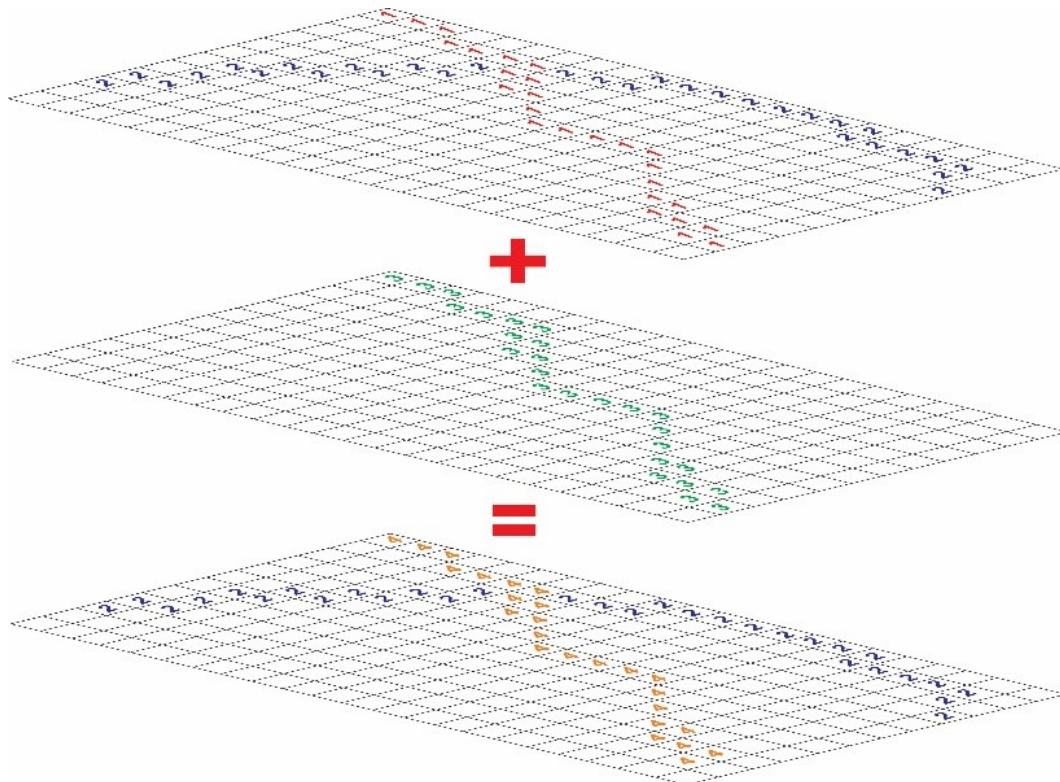
É possível modificar e combinar as informações das camadas de vários modos, entre eles [Olaya \(2011\)](#) exemplifica:

- (a) operadores aritméticos: funções matemáticas, soma, subtração, multiplicação, divisão ou a combinação de mais de um operador;
- (b) operadores lógicos: valores booleanos (0 ou 1, verdadeiro ou falso), restrito ou não

restrito, pertence ou não pertence ao conjunto, comparação, entre outros;

- (c) parâmetros estatísticos: o maior valor, a ordem de valor, valor mais frequente, entre outros.

Figura 5: Exemplo de álgebra dos mapas: soma de duas camadas resultando em uma nova camada de dados



Fonte: Adaptado de [OLAYA \(2011\)](#)

Outros exemplos de análises utilizando álgebra dos mapas podem ser visto em [Olaya \(2011\)](#) e [Heywood, Cornelius e Carver \(2006\)](#).

### 2.2.3 Caminho de mínimo custo

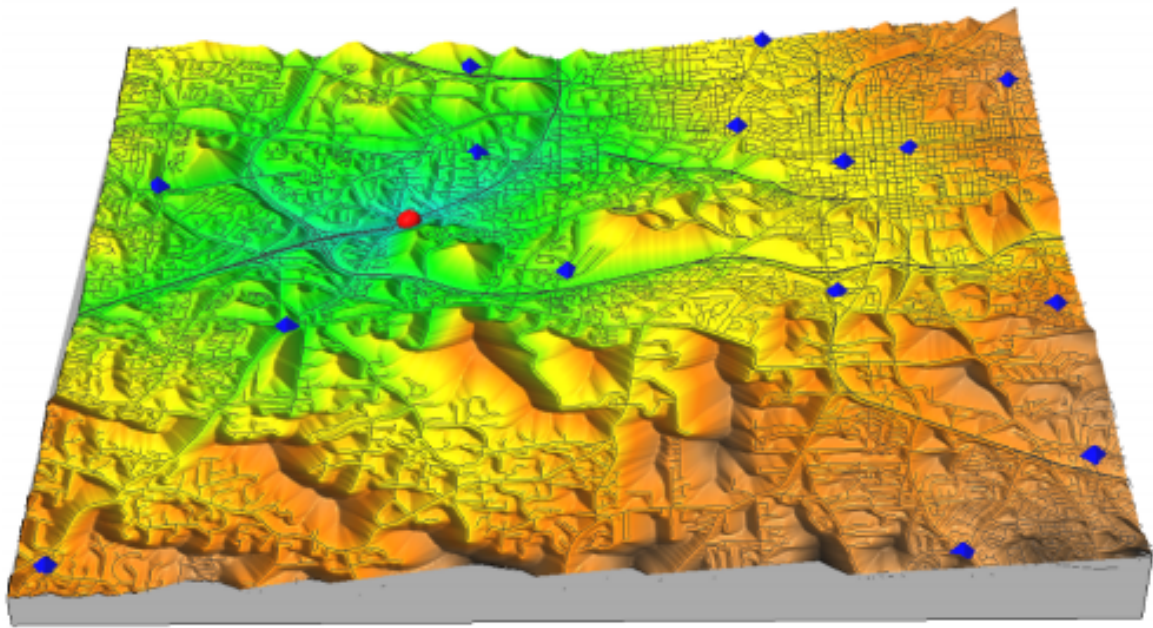
Conforme [Neteler e Mitasova \(2008\)](#), superfícies de custo são camadas em raster que mostram os custos cumulativos ao mover-se entre diferentes células ou posição geográfica. O valor atribuído a cada célula do raster representa o custo para atravessar essa célula.

[Neteler e Mitasova \(2008\)](#) exemplifica de maneira prática a superfície de custo. Suponha que houve um incêndio na estrada principal, indicado pelo ponto em vermelho na Figura 6. A tarefa é identificar a central de bombeiros, pontos azuis, que pode chegar



ao incêndio rapidamente. A decisão é influenciada por dois parâmetros: a velocidade da via e a distância para o incêndio. Levando em consideração os dois parâmetros, por meio da álgebra dos mapas é calculado a superfície de custo. A cor verde indica um menor custo para atravessar as células do raster, enquanto a amarela e vermelha um custo mais elevado.

Figura 6: Superfícies de custo com a representação do local do incêndio (ponto vermelho) e das centrais de bombeiros (pontos azuis)



Fonte: [NETELER; MITASOVA \(2008\)](#)

Por meio de uma função de mínimo custo é possível calcular qual a central de bombeiros que deve atender ao chamado.

O mínimo custo traça um caminho em uma superfície de custo. Ao atravessar uma célula o valor desta é somado ao valor anterior e comparado com a soma das outras células vizinhas, a célula que apresentar o resultado de menor valor é a escolhida como célula de passagem. Assim o caminho de menor custo é encontrado.

A Figura 7 exemplifica o funcionamento do caminho de mínimo custo. O local de partida fornecido pelo usuário no exemplo é a célula que contém o valor 19 (ponto inicial). O resultado mostra o caminho de menor custo para a movimentação da célula de partida para a célula de valor mais baixo (ponto final). É sempre necessário definir os pontos inicial e final para que o caminho entre os dois pontos seja criado.

Figura 7: Definição do caminho de mínimo custo

ENTRADA:	SAIDA:
SUPERFICIE DE CUSTO	CAMINHO DO MINIMO CUSTO
. . . . .	. . . . .
. 19. 20. 18. 19. 16. 15. 15.	. . . . .
. . . . .	. . . . .
. 20  19  17. 16. 17. 16. 16.	. . 1 . 1 . 1 . . . .
. . . . .	. . . . .
. 18. 18. 24. 18. 15. 12. 11.	. . . . 1 . . . .
. . . . .	. . . . .
. 22. 16. 16. 18. 10. 10. 10.	. . . . 1 . . . .
. . . . .	. . . . .
. 17. 15. 15. 15. 10. 8 . 8 .	. . . . . 1 . . . .
. . . . .	. . . . .
. 24. 16. 8 . 7 . 8 . 0 . 12.	. . . . . 1 . . . .
. . . . .	. . . . .
. 17. 9 . 8 . 7 . 8 . 6 . 12.	. . . . .
. . . . .	. . . . .

Fonte: [MILLER \(2001\)](#)

Muitos softwares de SIG já integram as funções de superfície de custo e mínimo custo em seus sistemas. É o caso do *GRASS GIS* que possui os comandos *r.cost* para criar a superfície de custos e *r.drain* para obter o caminho de mínimo custo.

#### 2.2.4 Métodos de comparação de poligonais

Segundo [Bethonico \(2016\)](#), comparar duas formas distintas é, na maioria dos casos, uma tarefa simples de se realizar visualmente. No entanto, em muitos casos, há uma necessidade de se automatizar esse processo e de se obter uma medida comparativa para definir o quão próximo um conjunto ou forma está de outro.

Conforme [Zhao, Shi e Deng \(2005\)](#), um dos problemas mais importantes de reconhecimento de padrões em computadores é o de determinar se uma forma é similar à outra. As técnicas de similaridade podem ser vistas como medidas para identificar o grau de semelhança ou diferença entre duas formas ou objetos.

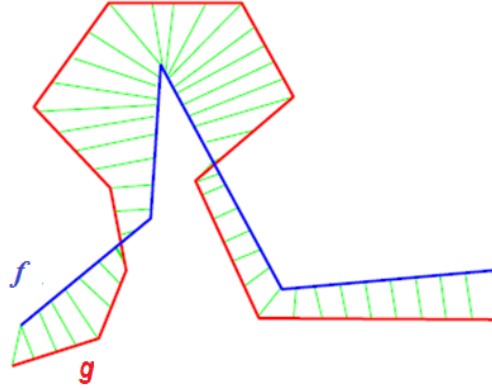
A Distância Discreta de Fréchet (DDF) é uma variação da distância de Fréchet, desenvolvida por [Eiter e Mannila \(1994\)](#) para trabalhar com poligonais. Ela é uma medida de semelhança entre as curvas, que leva em conta a localização e a ordenação dos pontos ao longo das curvas. Dadas duas curvas  $f : [a, b] \rightarrow V$  e  $g : [a', b'] \rightarrow V$ , onde  $a$  e  $b \in \mathbb{R}$ ,  $a \leq b$ ,  $V$  é o espaço métrico, e  $d$  a distância euclidiana, a DDF é definida como:

$$\delta_F(f, g) = \inf_{\alpha, \beta} \max_{t \in [0, 1]} d(f(\alpha(t)), g(\beta(t))) \quad (1)$$

Fonte: [EITER; MANNILA \(1994\)](#)

A Figura 8 ilustra a lógica do cálculo da DDF.

Figura 8: Distância Discreta de Fréchet



Fonte: [ALT; ALBERS; NäHER \(2009\)](#)

As linhas verdes na Figura 8 representam o caminho que a função matemática faz para armazenar os valores de distâncias euclidianas. O valor da DDF é a maior das distâncias euclidianas calculadas.

A Distância Modificada de Hausdorff (DMH) é o método proposto por [Dubuisson e Jain \(1994\)](#) com base na distância de Hausdorff. A DMH é definida matematicamente como:

$$h_{MHD}(A,B) = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} d(a_i, B) \quad (2)$$

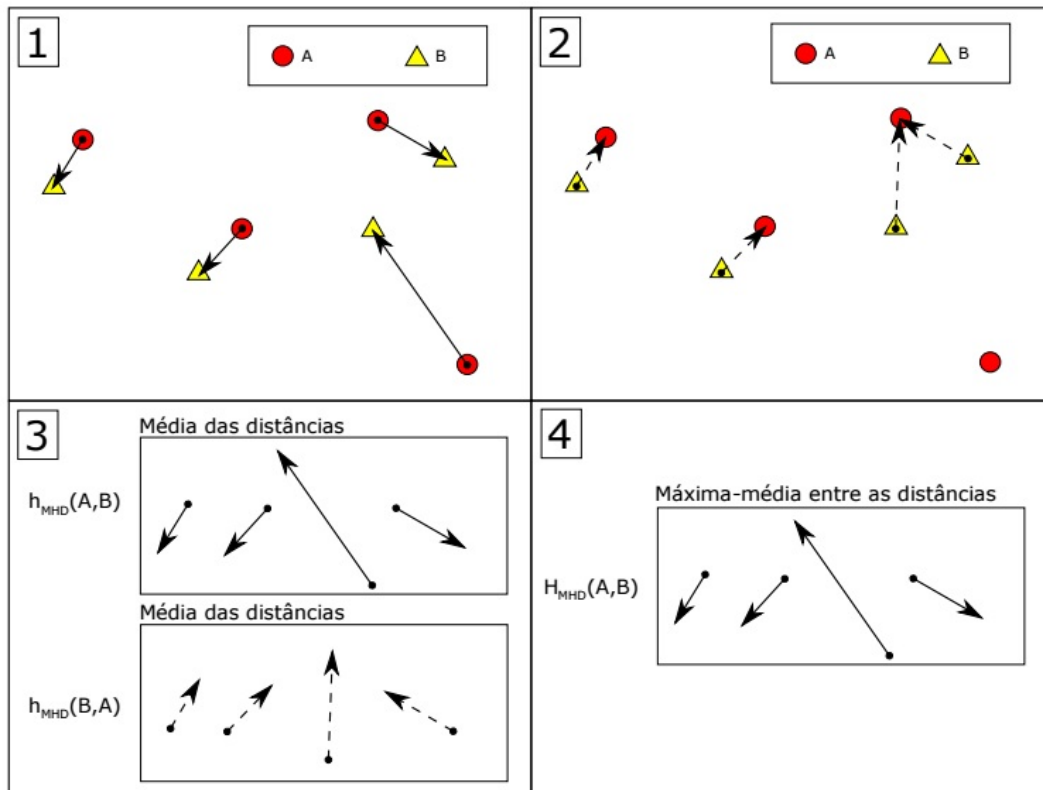
$$h_{MHD}(B,A) = \frac{1}{n_b} \sum_{j=1}^{n_b} d(b_j, A) \quad (3)$$

$$H_{MHD}(A,B) = \max[h_{MHD}(A,B), h_{MHD}(B,A)] \quad (4)$$

Fonte: [BETHONICO \(2016\)](#)

A Figura 9 ilustra a lógica de cálculo da DMH. Calculam-se primeiramente as distâncias mínimas, na iteração normal (quadro 1) e na iteração reversa (quadro 2). Em seguida, obtém-se a média das distâncias (quadro 3) calculadas em cada iteração. A DMH é o valor máximo obtido (quadro 4) entre as duas médias calculadas.

Figura 9: Processo de cálculo da Distância Modificada de Hausdorff



Fonte: BETHONICO (2016)

### 2.3 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Segundo Miranda (2010), a Análise Multicritério (AMC) consiste em um método, ou conjunto de métodos, que permite fazer uma escolha entre alternativas levando em conta vários critérios. A manipulação de “vários critérios” popularizou o uso do termo “multicritério”. Esse método é capaz de manipular tanto critérios quantitativos quanto qualitativos.

Ainda segundo Miranda (2010), existem vários métodos de AMC, o primeiro método surgiu na França, conhecido como Electre. Pelos anos 80 haviam mais de 40 métodos, usados com diferentes propósitos e em diferentes contextos. Na década de 90 a AMC foi amplamente difundida e empregada em projetos de investimento (infraestrutura, energético, agrícolas, etc), que apresentam impactos nas dimensões econômica, social e ambiental, requerendo abordagem multidimensional.

Conforme Junior (2006), a AMC surgiu a partir da necessidade de decisão gerada por problemas complexos, onde é preciso analisar critérios pessoais de preferência, como aspectos políticos, risco e custo, por exemplo.

Lopes (2015) diz que, a AMC permite que diversos aspectos que influenciam diretamente no resultado final sejam analisados simultaneamente, permitindo até mesmo que esses aspectos sejam conflitantes. É possível, por exemplo, em um traçado ferroviário, que o caminho mais curto esteja em uma área de montanhas que requer um elevado número de túneis e viadutos, implicando, assim, em custos mais altos. Não sendo, portanto, o caminho mais curto o melhor.

### 2.3.1 *Analytic Hierarchy Process*

Um dos métodos difundidos de AMC é o proposto por Thomas L. Saaty em 1980, método conhecido como *Analytic Hierarchy Process* (AHP – Método da Análise Hierárquica).

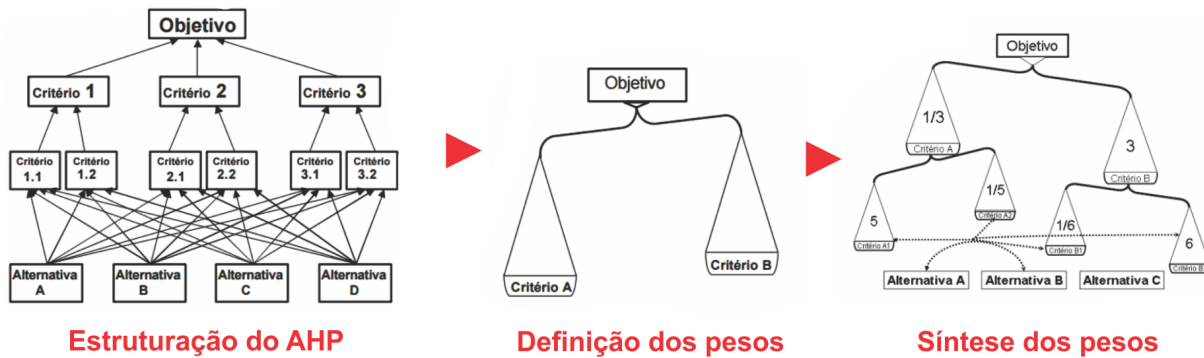
Conforme Junior (2006), o Método da Análise Hierárquica, ou *Analytic Hierarchy Process* (AHP), foi desenvolvido por Thomas L. Saaty em resposta às necessidades do planejamento de contingência militar, tomada de decisão, alocação de recursos escassos, resolução de conflitos e a necessária participação política nos acordos negociados da Agência de Controle de Armas e Desarmamento do Departamento de Estado Americano.

Segundo Wolff (2008), o método tem como base a categorização do problema em níveis hierárquicos independentes. A partir de um conjunto de alternativas, é possível estimar prioridades para cada uma delas. O procedimento se dá pela geração de critérios de decisão pelo tomador (ou tomadores) de decisão e pela comparação das alternativas, duas a duas, em relação a esses critérios. Portanto, seu funcionamento é direcionado a transformar uma decisão complexa em algumas decisões mais simples.

Wolff (2008) afirma ainda que, levando em consideração a variedade e contexto de aplicações, o AHP é fortemente indicado para situações relacionadas a transportes. Uma característica importante é a possibilidade de considerar na decisão a opinião e os interesses, muitas vezes conflitantes, de várias partes interessadas. Outra vantagem do AHP é sua possibilidade de integração com um SIG, permitindo agrupar as variáveis envolvidas em um estudo, especializá-las e analisá-las em conjunto.

Conforme Saaty (2008), para tomar uma decisão de forma organizada é necessário decompô-la nas seguintes etapas (Figura 10):

Figura 10: Etapas do AHP



Fonte: Adaptado de [JUNIOR \(2006\)](#)

- (I) Estruturação do AHP: Identificar corretamente o objetivo e estruturar as decisões de forma hierárquica. A hierarquia nada mais é que a decomposição do problema. Essa etapa exige grande conhecimento do tomador de decisão e da equipe.
- (II) Definição dos pesos dos parâmetros: Conforme [Miranda \(2010\)](#), a seleção dos pesos é uma etapa importante e é, muitas vezes, uma responsabilidade política, apoiada por informações de especialistas.
- (III) Comparação par a par: Construir um conjunto de matrizes de comparação par a par. Comparando cada parâmetro em um dado nível da hierarquia. As prioridades dos parâmetros são dadas por comparação par a par em relação a sua contribuição ao critério imediatamente acima.
- (IV) Síntese dos pesos: Usar a contribuição das prioridades obtidas a partir das comparações. Fazer isso para cada parâmetro. Continuar esse processo de comparação até que se obtenham as prioridades finais das alternativas de modo a avaliar o resultado referente ao objetivo.

Na etapa de definição dos pesos dos parâmetros, o AHP permite transformar as comparações, na maior parte das vezes empíricas, em números. Essa capacidade de conversão é o principal diferencial do AHP com relação a outras técnicas comparativas. Para fazer as comparações, [Saaty e Vargas \(2012\)](#) propõem uma escala de números que indica quantas vezes um elemento é mais importante que outro elemento (Tabela 1).

Tabela 1: A escala fundamental de Saaty

Intensidade da importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem de forma idêntica para o objeto
3	Pouco mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é um pouco mais importante que o outro
5	Muito mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é claramente mais importante que o outro
7	Bastante mais importante	A análise e a experiência mostram que um dos critérios é predominante para o objetivo
9	Extremamente mais importante	Sem qualquer dúvida um dos critérios é absolutamente predominante para o objetivo
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Podem ser usados
1.1-1.9	Valores muito próximos	Também podem ser usados. Apresentam a dificuldade em encontrar o melhor valor.

Fonte: Adaptado de [SAATY; VARGAS \(2012\)](#)

A partir da escala fundamental de Saaty é construída a matriz comparação dos parâmetros, definindo os pesos dos parâmetros (Tabela 2).

Tabela 2: Exemplo de matriz comparação

	Parâmetro A	Parâmetro B
Parâmetro A	1	Peso
Parâmetro B	1/Peso	1
Soma	$(1 + 1/\text{Peso})$	$(\text{Peso} + 1)$

Fonte: Adaptado de [SAATY; VARGAS \(2012\)](#)

No AHP é necessário avaliar a consistência dos pesos dados aos parâmetros. Para isso, é necessário calcular o *auto vetor principal* e o *máximo auto valor*.

O *auto vetor principal* é a soma da divisão de cada elemento da matriz pelo somatório da coluna a quem este pertence. Após isso os valores de cada parâmetro são ainda somados e divididos pelo número de parâmetros.

Já o *máximo auto valor* ( $\lambda \max$ ) é a soma da multiplicação do auto vetor principal pelo valores da soma das colunas.

Assim, são definidos os Índice de Consistência (IC), e o Índice de Aleatoriedade (CR):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Fonte: SAATY; VARGAS (2012)

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,1 (10\%) \quad (6)$$

Fonte: SAATY; VARGAS (2012)

Para que a consistência dos pesos dos parâmetros seja aprovada, CR precisa ser menor que 0,1.

### 2.3.2 Análise de sensibilidade

Conforme Junior (2006), a análise de sensibilidade é usada para avaliar a coerência do resultado nas alternativas, com respeito a cada um dos parâmetros que os compõe. Consiste, basicamente, em alterar o peso e os parâmetros na estrutura e ver o impacto no resultado. Essa análise mostra a fragilidade ou não das preferências expressadas nas alternativas. Por exemplo, se for encontrado um impacto significativo, capaz de modificar o resultado, o critério onde foi detectado essa sensibilidade deve ser submetido a uma análise crítica pelo tomador de decisão para confirmar sua avaliação.

Gomes (2009) diz que o AHP permite a existência de revisões sucessivas, permitindo assim que os tomadores de decisão possam tanto expandir os elementos da hierarquia do problema, como também mudar seus julgamentos. Isto permite que a sensibilidade do resultado seja investigada, testando possíveis consequências diante de quaisquer tipos de mudanças prognosticadas. Outra característica marcante do AHP é a possibilidade de checar a estabilidade dos julgamentos e preferências escolhidos pelo decisor. Assim, cada iteração do AHP leva a um refinamento progressivo e, consequentemente, a uma compreensão mais acurada do sistema.

Conforme Gomes (2009), a análise de sensibilidade pode ser feita envolvendo a alteração nos seguintes elementos:

- (a) Pesos relativos dos parâmetros: Um peso excessivo atribuído a um determinado parâmetro pode favorecer uma alternativa de resultado em relação às outras. Assim, uma variação sensível dos pesos relativos pode constatar a resistência de mudança do resultado final. Logo, para todas as comparações par a par entre parâmetros, pode-se alterar os valores das comparações relativas em valores pequenos, permitindo



assim avaliar se o resultado final altera ou não;

- (b) Julgamento das alternativas: Neste método admite-se que as preferências dos pesos dos parâmetros nas matrizes do AHP possam variar entre uma tendência otimista e pessimista, resultando na análise de três matrizes de julgamento que conduzem a um determinado resultado final; e
- (c) Quantidade de parâmetros: Em se tratando de alteração na quantidade de parâmetros utilizada na estrutura hierárquica do problema em questão, duas possibilidades podem ser avaliadas: a inserção e a retirada de parâmetros. Quando a inserção ou retirada de parâmetros não provocar alterações abruptas no resultado, então a estrutura hierárquica inicial do problema mostra-se adequada para julgá-lo. Por outro lado, a árvore de decisão deve estar completa, com todos os parâmetros importantes e decisivos para a avaliação do problema. Incluir outros parâmetros importantes para a análise do problema pode garantir a completude e operacionalidade desejáveis, avaliando a robustez da ordenação global das alternativas. Em outras palavras, caso a inserção de parâmetros importantes para o decisor e que foram desconsiderados anteriormente provoca uma alteração substancial na ordenação das alternativas, provavelmente a estrutura hierárquica do problema não estava completa;

## 2.4 INTEGRAÇÃO SIG/AMC

Segundo [Valente e Vettorazzi \(2009\)](#), embora a técnica de AMC possa ser empregada fora do ambiente SIG, é na integração com o SIG que seu potencial é melhor explorado.

Conforme [Malczewski \(2004\)](#), a integração da Análise Multicritério (AMC) com os Sistema de Informações Geográficas (SIG) trouxe um considerável avanço para a análise do uso do solo. A combinação de SIG com a AMC pode ser definido como um processo que combina e transforma os dados espaciais e não espaciais (entrada) em uma decisão (saída). Os procedimentos da integração SIG/AMC envolvem a utilização de dados geográficos e os critérios de preferência dos tomadores de decisão.

Assim, duas características resumem o AMC espacial: (i) a capacidade do SIG de aquisição de dados, armazenamento, recuperação, manipulação e análise, e (ii) a capacidade da AMC para combinar os dados geográficos e preferências dos tomadores de

decisão.

Miranda (2010) afirma que muitos métodos de AMC disponíveis podem ser implementados em SIG. Essa implementação fica facilitada se o SIG possuir uma linguagem de programação.

As áreas de aplicação do AMC espacial são as mais diversificadas possíveis, alguns exemplos:

- Escolha de áreas para cultivo de Camarão (SALGADO; BLANCO, 2000).
- Localização de Usinas Termoeletricas (ZAMBON et al., 2005).
- Determinação de áreas com risco vulcânico (ACEVES-QUESADA; LÓPEZ-BLANCO; POZZO, 2006).
- Priorização de manutenção e reabilitação de pavimentos (LIMA; RAMOS; JÚNIOR, 2008).
- Áreas prioritárias à restauração florestal (VALENTE; VETTORAZZI, 2009)
- Traçado de corredores de transporte (LOPES, 2015) e (NOBREGA et al., 2009)

#### 2.4.1 Definição de traçado de obras lineares

A prática para a identificação de alinhamentos de obras lineares era essencialmente uma função manual. O planejador utilizava muitas vezes da experiência e intuição para criar e selecionar o traçado. Com o avanço da tecnologia computacional surgiram as plataformas CAD que facilitaram o processo. Ainda assim, o processo de definição do traçado era lento e limitado em termos de número de alinhamentos que podiam ser avaliados pelos tomadores de decisão. Com o tempo novas técnicas de definição de traçados lineares surgiram, trazendo principalmente o apoio dos SIG.

Segundo Gipps, Gu e Barnett (2001) para uma abordagem abrangente do problema de obtenção de traçados lineares é necessário a convergência de uma série de áreas tecnológicas, entre elas:

- (a) Geotecnologia: Imagens e dados geospaciais, uso de imagens de satélite, modelos digitais de terrenos (DTM) entre outros;
- (b) Análise regional: questões ambientais e de proteção da biodiversidade, uso do solo, geotécnica, obras lineares presentes (tais como estradas, rios, ferrovias e oleodutos),

zonas que requerem tratamento especial por razões sociais ou ambientais (como parques, cidades ou produção de alimentos);

- (c) Características geométricas da obra: raios mínimos da curva, gradientes máximos, cruzamentos, corte e aterro entre outros.

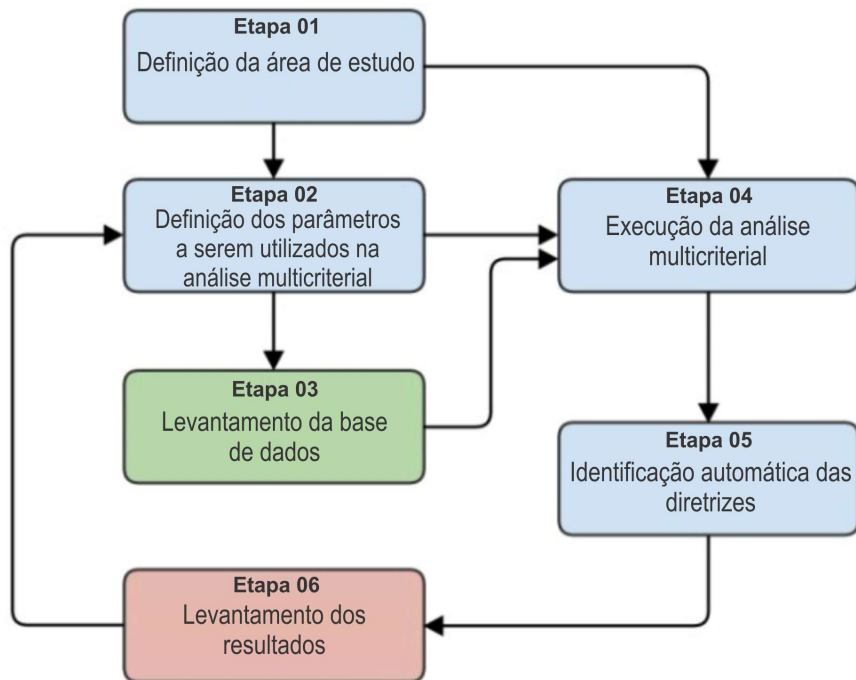
[Nobrega et al. \(2009\)](#) diz que, fatores (como rios e corpos d'água, inclinação, áreas urbanizadas, áreas de interesse) são extraídos a partir de camadas (como hidrologia, altitude, cobertura do solo, zoneamento urbano, entre outros conjuntos de dados). Esses parâmetros são então selecionados e seus respectivos rankings são alocados de acordo com prioridades diferentes. A integração SIG/AMC permite a análise espacial usando uma combinação de fatores e pesos.

[Nobrega et al. \(2009\)](#) complementa que, a integração SIG/AMC permite a aplicação e a modelagem de preferências (ou pesos de parâmetros) de todas as partes interessadas, oferecendo, assim, a oportunidade de melhorar a coordenação e colaboração entre organismos de planejamento, agências de recursos, profissionais de transporte e cidadãos afetados.

[Lopes \(2015\)](#) apresenta um método para geração de diretrizes de traçado de obras lineares a partir da hierarquização de parâmetros de restrições e possibilidades. O método utiliza de Análise Multicritério integrada em plataforma SIG (Figura 11).

O método proposto por [Lopes \(2015\)](#) consiste na análise da legislação e da área de estudo para a definição dos parâmetros a serem utilizados na análise multicritério. A estrutura do AHP (Figura 13) está dividida em três grandes grupos, ambiental, técnico e socioeconômico. Incluídos nesses grupos estão parâmetros que foram representados por camadas de dados georreferenciados, hierarquizados e ponderados em função do processo de hierarquização AHP.

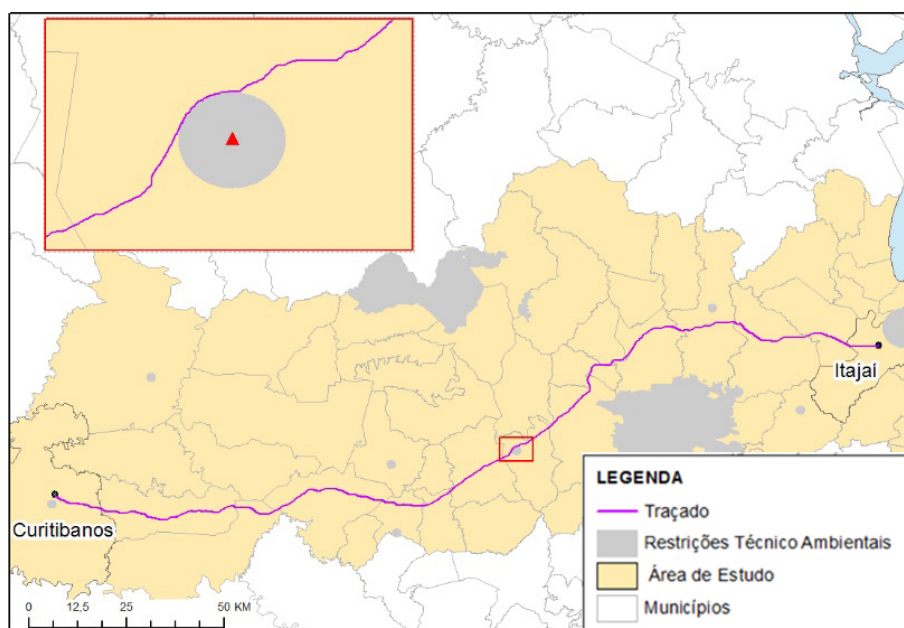
Figura 11: Fluxograma do método de trabalho de Lopes(2015)



Fonte: LOPES (2015)

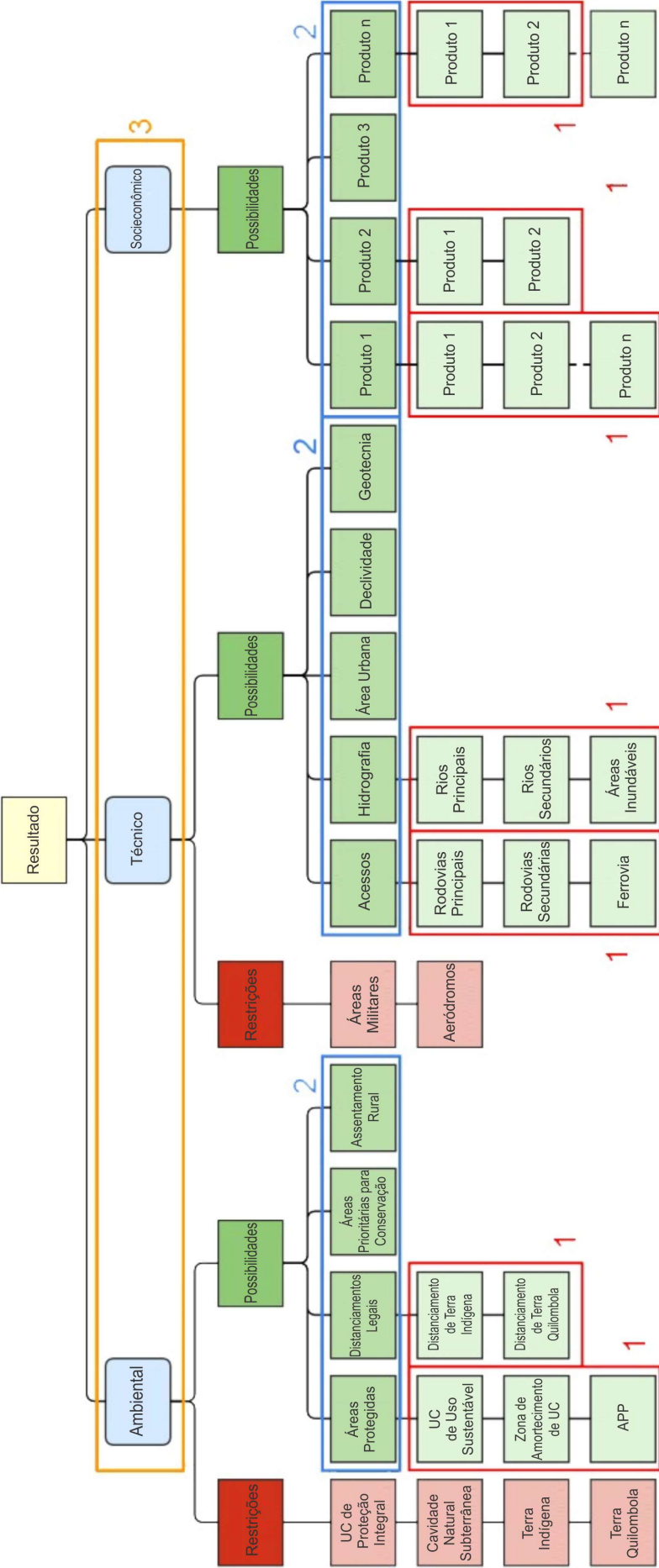
Além dos parâmetros em camadas hierarquizadas, o método de Lopes (2015) propõe o uso de camadas restritivas que inviabilizam a passagem do traçado nestas áreas, aplicando uma análise booleana considerando as áreas restritivas com valor igual a zero e as demais áreas da área de estudo com valor igual a um. Esta ação inviabiliza a geração de diretriz de traçado nas áreas restritivas (Figura 12).

Figura 12: Restrições e diretriz de traçado ferroviário sobrepostos



Fonte: LOPES (2015)

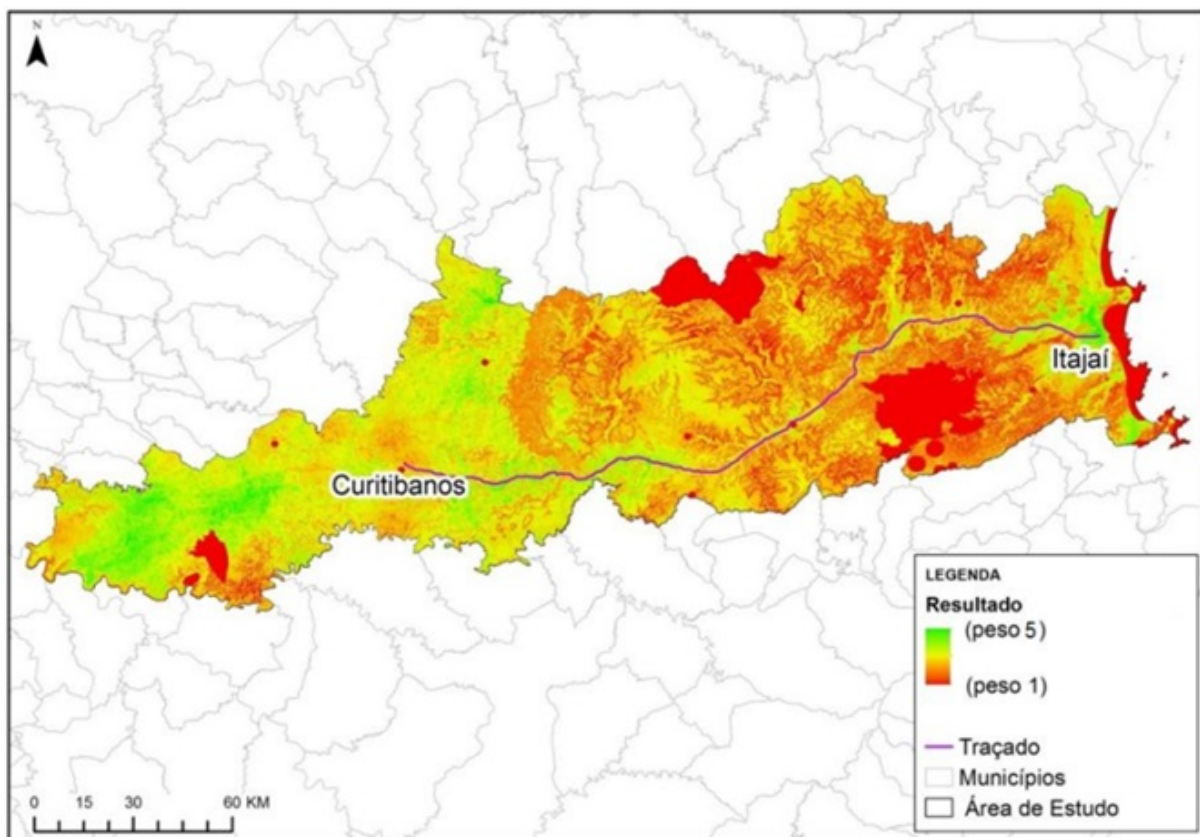
Figura 13: Hierarquização do método AHP proposto por Lopes (2015)



Fonte: LOPES (2015)

O resultado obtido por meio da álgebra dos mapas com os valores de contribuição de cada camada e restrições originou uma camada resultado com as áreas de melhores possibilidades para o recebimento do traçado (Figura 14). A partir da camada resultado foi gerada uma superfície de custos que foi utilizada para a geração automática do melhor traçado por meio de um algoritmo de mínimo custo.

Figura 14: Camada resultante e melhor diretriz de traçado

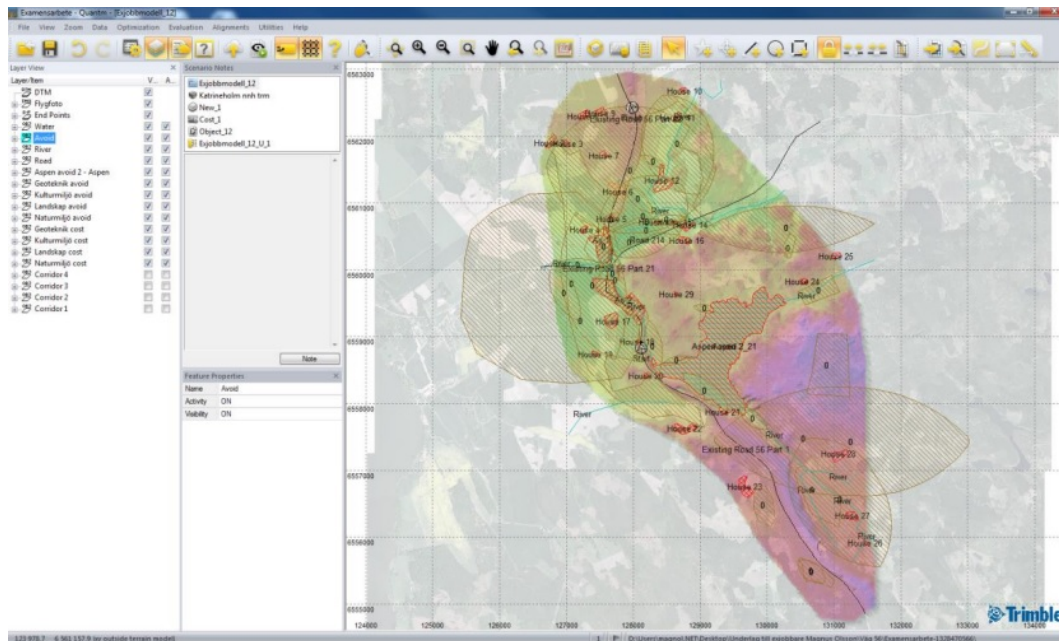


Fonte: [Lopes \(2015\)](#)

Outro sistema de definição de traçados é o software *Quantm*. O *Quantm*<sup>1</sup>, desenvolvido pela empresa australiana Trimble, é uma tecnologia de otimização de rotas, que, segundo a empresa, permite fazer uma análise simultânea, levando em consideração os fatores de engenharia, ambientais, sociais e econômicos ao planejar um novo traçado linear. A tecnologia do Quantm analisa milhares de possibilidades e gera uma série de alternativas a serem consideradas pela equipe de planejamento. Uma visualização de um modelo em Quantm pode ser vista na Figura 15.

<sup>1</sup>Trimble Quantm Software - <http://www.trimble.com/alignment>

Figura 15: Visualização de um modelo em Quantm

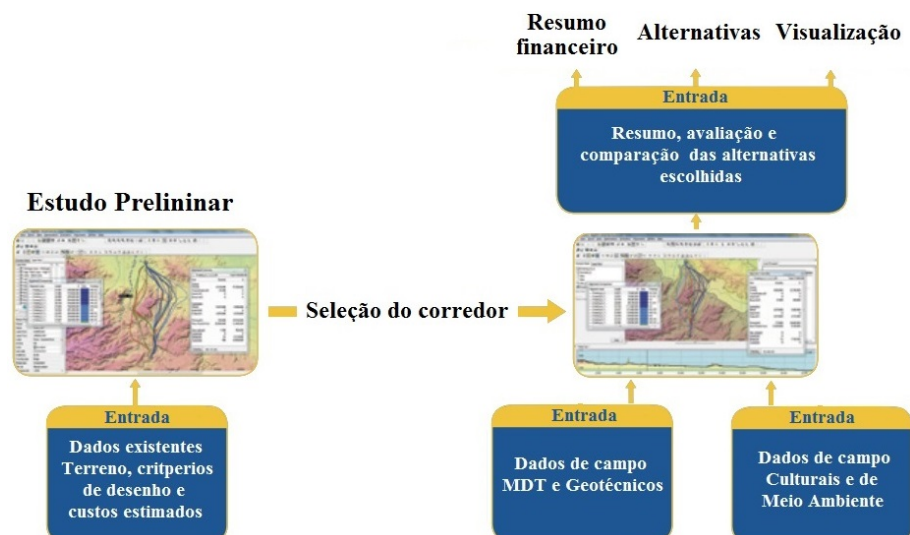


Fonte: OLSSON (2013)

O sistema *Quantm* leva em consideração as questões geométricas do alinhamento. É necessário, portanto, entrar com dados de custos como, custos das curvas horizontais, verticais, gradiente, como também os custos de obras de arte especiais, como túneis e pontes. Os custos da análise regional são feitos por meio de incrementos nos custos totais.

A Figura 16 apresenta as etapas do planejamento e da obtenção de alternativas ao traçado utilizando o Quantm.

Figura 16: Etapas do planejamento e da obtenção de alternativas ao traçado utilizando o Quantm



Fonte: Adaptado de Trimble (2016)

Primeiramente é feito um estudo preliminar para a obtenção dos corredores, esse estudo é feito com dados existentes e custos estimados. Após a seleção do corredor são necessários dados com maior precisão, assim, são coletados dados em campo. Por meio desses dados o software gera as alternativas bem como o resumo financeiro e a visualização 3D dos traçados.

Além dos dois modelos apresentados existem outro softwares que contribuem para os estudos de traçado como o *Infraworks 360*<sup>2</sup> da *Autodesk*.

---

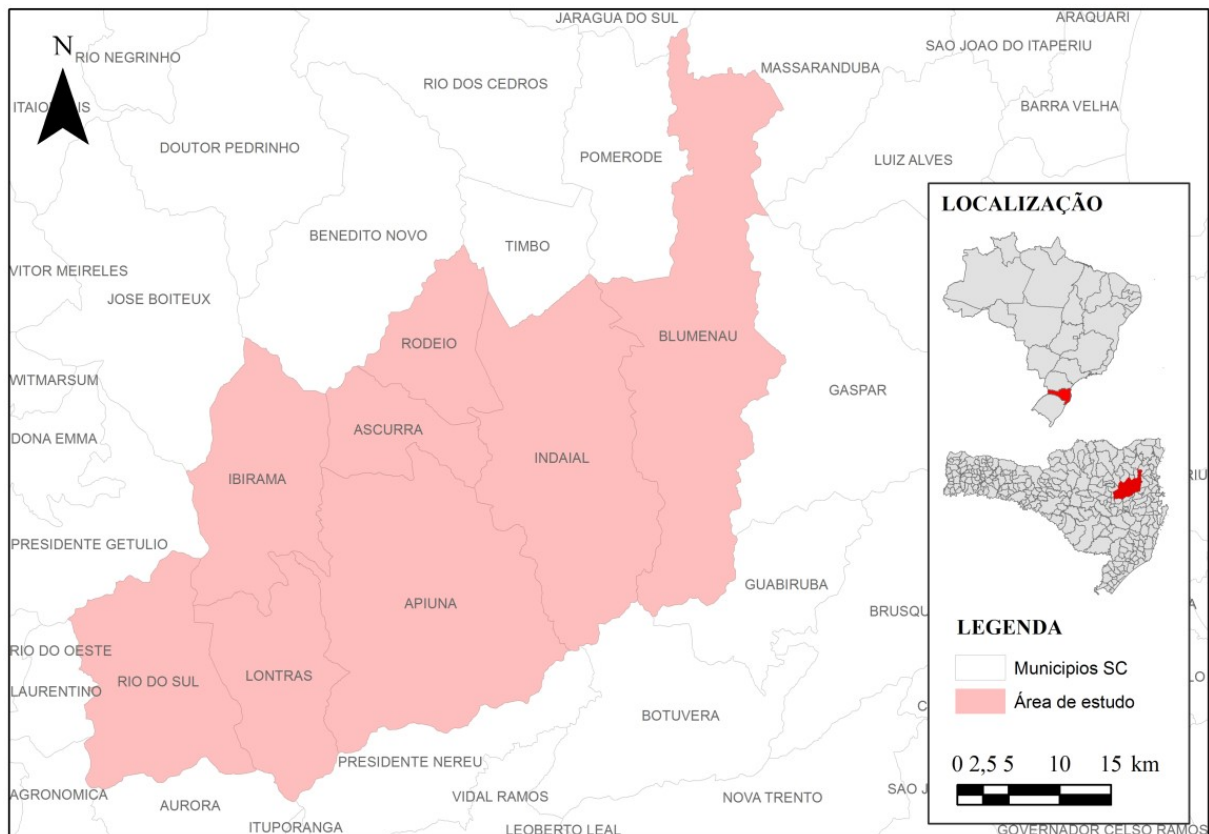
<sup>2</sup>Autodesk Infraworks - <http://www.autodesk.com.br/products/infraworks-family/overview>



### 3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 17) proposta compreende as cidades entre Blumenau e Rio do Sul no Vale do Itajaí em Santa Catarina.

Figura 17: Área de estudo



Fonte: Elaboração própria

A região faz parte da área que pode receber um trecho da EF-280 – Corredor Ferroviário de Santa Catarina (CFSC), conhecida também como Ferrovia da Integração ou Ferrovia do Frango.

Conforme VALEC (2016), o principal objetivo do CSFS é, a princípio, o transporte de cargas, reduzindo o valor do frete e proporcionando uma alternativa para o direcionamento de cargas para os portos de Itajaí/SC, Paranaguá/PR ou Rio Grande/RS.

A operação do trecho para o transporte de passageiros não é descartada, principalmente numa possível ligação da CFSC com outra ferrovia planejada, a Ferrovia Litorânea. Linhas ligando as regiões da Grande Florianópolis e o Vale do Itajaí são propostas de uma possível solução para o alto nível de tráfego de carros e o grande número de acidentes que acontecem nas principais rodovias dessas regiões.

Para a aplicação do método, é necessário fazer um levantamento de dados da área de estudo. Estes devem respeitar a estrutura da AMC definida em [Lopes \(2015\)](#). Os dados foram obtidos diretamente com o autor da tese.

As camadas geográficas respeitam a lista de dados mínimos do DNIT para um estudo de traçado ferroviário, apresentados no item 2.1.1. A Tabela 3 apresenta os dados e as fontes que foram utilizados no estudo.

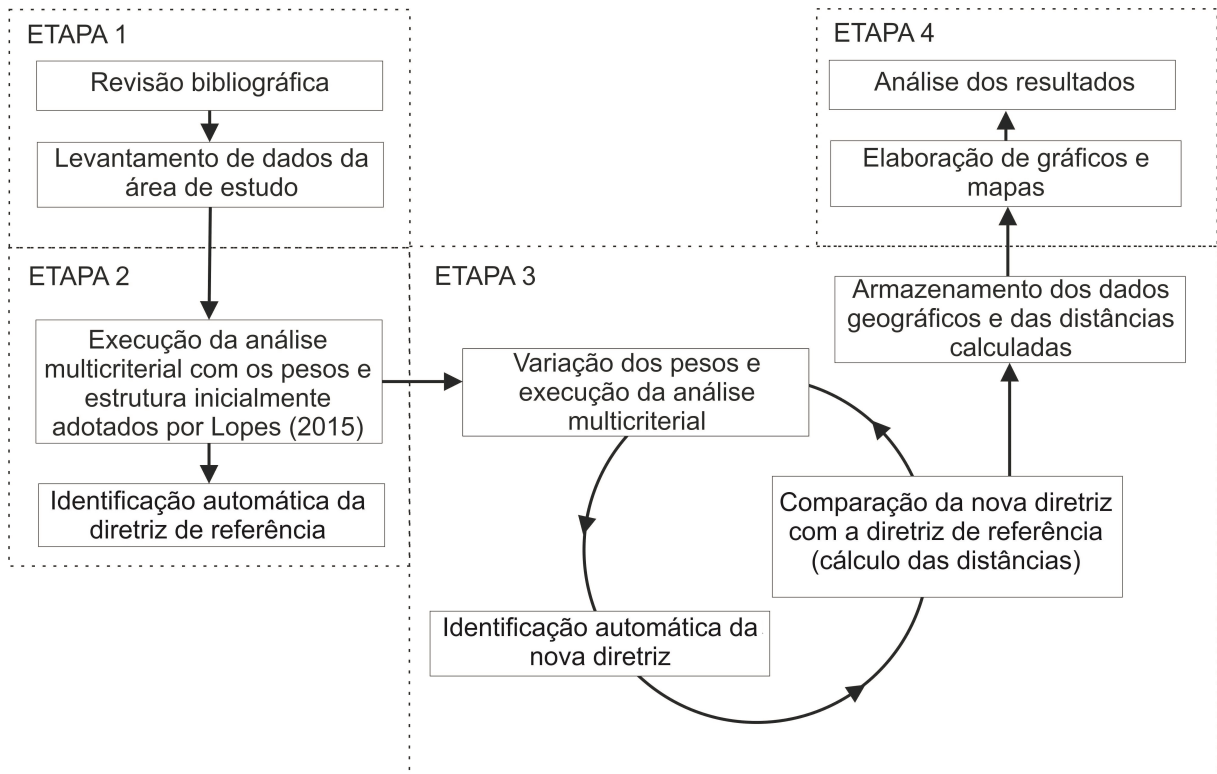
Tabela 3: Dados geográficos utilizados no estudo

<b>Dado geográfico</b>	<b>Fonte</b>
Unidade de conservação de proteção integral	SNUC 2000
Distanciamento de terras indígenas	FUNAI 2011
Distanciamento de terras quilombolas	INCRA 2011
Zona de amortecimento de unidade de conservação	IBAMA 2011
Áreas de preservação permanente	BCIM 2009
Áreas prioritárias para conservação	MMA 2007
Assentamento rural	INCRA 2011
Rodovias principais	DNIT 2007
Rodovias secundárias	DNIT 2007
Ferrovias	ANTT 2012
Rios principais	BCIM 2009
Rios secundários	BCIM 2009
Áreas inundáveis	BCIM 2009
Área urbana	IBGE 2012
Declividade	EMBRAPA
Geotécnica	IBGE 2011
Soja	IBGE 2011
Milho	IBGE 2011
Trigo	IBGE 2011
Suínos	IBGE 2011
Bovinos	IBGE 2011
Galinhas	IBGE 2011

## 4 MÉTODO E FERRAMENTAS

O método do trabalho segue o fluxograma da Figura 18.

Figura 18: Fluxograma do método do trabalho



Fonte: Elaboração própria

A Etapa 1 (pesquisa) é composta pela revisão bibliográfica e pela obtenção dos dados geográficos da área estudada.

A revisão bibliográfica se estendeu por todo o trabalho e abrangeu a leitura e interpretação de livros, artigos científicos, teses, normas e estudos de viabilidade que poderiam contribuir com o assunto estudado. Teve o objetivo de construir o referencial teórico e aprofundar o conhecimento no tema.

Os dados geográficos necessários ao estudo foram obtidos diretamente com [Lopes \(2015\)](#), que realizou o levantamento da base de dados por meio de pesquisa em sites dos órgãos oficiais.

Na Etapa 2 (diretriz de referência) foi executada a análise multicriterial (AMC) e a obtenção da diretriz de referência, conforme o método de definição de traçado apresentado por [Lopes \(2015\)](#).

Os pesos dos parâmetros propostos por [Lopes \(2015\)](#) foram mantidos na Etapa 2.

Com o resultado da AMC foi possível gerar uma superfície de custo. Essa superfície de custo foi usada como dado de entrada para a obtenção da diretriz de referência por meio da função de caminho mínimo.

A Etapa 3 (variação dos pesos dos parâmetros) é onde se obtém os dados para a análise de sensibilidade. No presente estudo a análise de sensibilidade será feita utilizando o método de variação nos pesos relativos dos parâmetros. Assim, a etapa se constitui pela sequência de variação dos pesos dos parâmetros, execução da AMC com os novos pesos e obtenção das novas diretrizes.

As novas diretrizes de traçado geradas são comparada com a diretriz de referência. São utilizados métodos de reconhecimento de similaridades com o objetivo de quantificar a semelhança entre as diretrizes. São calculadas as Distâncias Discretas de Fréchet (DDF) e as Distâncias Modificadas de Hausdorff (DMH) para cada nova diretriz gerada.

A terceira etapa foi repetida diversas vezes, variando todos os parâmetros usados na AMC. Por fim, os dados de variação dos pesos dos parâmetros e distâncias obtidas na comparação das diretrizes são armazenados em uma base de dados.

Tanto a Etapa 2 quanto a 3 foram realizadas no software livre *GRASS GIS*. O método foi todo implementado em um script de uso integrado ao software. O script pode ser consultado no APÊNDICE B.

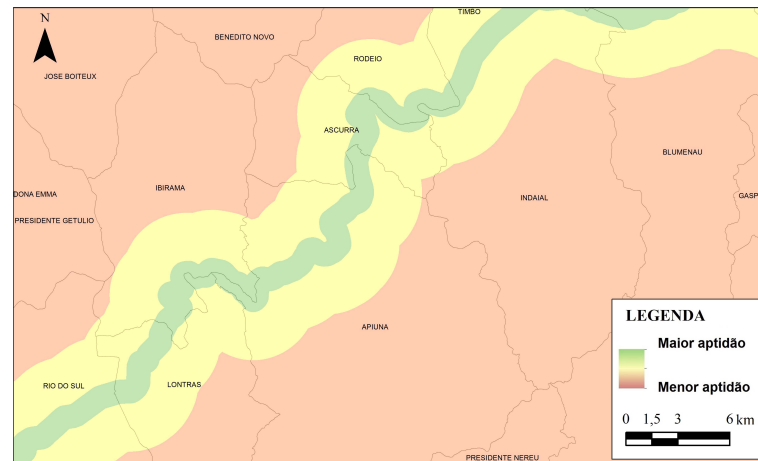
Com a base de dados resultante da Etapa 3 foram elaborados mapas e gráficos com o objetivo de auxiliar análise dos resultados.

#### 4.1 ETAPA 1 – LEVANTAMENTO DOS DADOS DA ÁREA DE ESTUDO

Embora [Lopes \(2015\)](#) já tivesse uma área de estudo definida, na execução do método, houve a necessidade de diminuir essa área. Isso foi devido ao tempo necessário de execução do script que aumenta conforme o número de células (pixels) do RASTER e com o tamanho da área estudada. Preferiu-se, então, diminuir a área de estudo, o que agilizou e não interferiu na aplicação do método.

Seguindo a metodologia de [Lopes \(2015\)](#), as camadas geográficas obtidas para a área de estudo foram classificadas como mais propícias (peso 5) e menos propícias (peso 1) a receber o traçado ferroviário e agrupadas em três grandes grupos, ambiental, técnico e socioeconômico. A Figura 19 mostra um exemplo de dado geográfico já classificado. Os mapas dos dados geográficos podem ser consultados no APÊNDICE C.

Figura 19: Exemplo de camada geográfica classificada - Rodovias principais



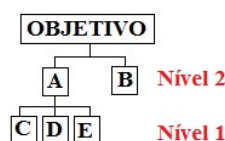
Fonte: DNIT (2007)

#### 4.2 ETAPA 2 – OBTENÇÃO DA DIRETRIZ DE REFERÊNCIA

O objetivo da Etapa 2 é obter a diretriz de referência, ou seja, a diretriz do traçado que é gerada utilizando os pesos dos parâmetros originalmente definidos em [Lopes \(2015\)](#). Essa diretriz é usada na comparação com as novas diretrizes geradas na Etapa 3. É necessário, inicialmente, executar a AMC na base de dados previamente levantada.

O AHP é aplicado em etapas, assim, cada parâmetro faz parte de uma hierarquização e sua contribuição é definida conforme os pesos escolhidos pelos tomadores de decisão. Os parâmetros de nível 1 fazem parte de um grupo que formam parâmetros de nível 2, que, por sua vez, fazem parte do nível 3. Assim, o nível 3 é o nível mais alto do AHP e onde estão vinculados todos os outros parâmetros dos níveis inferiores. A participação no resultado final tende a ser maior se o parâmetro estiver em um nível mais elevado. Para tornar mais didático, será apresentado um exemplo fictício de aplicação do AHP:

**Estruturação do AHP** No exemplo fictício (Figura 20) os parâmetros A e B estão nos níveis mais altos da estrutura, enquanto que os parâmetros C, D e E são a decomposição do parâmetro A.



Fonte: Elaboração própria

**Definição do peso dos parâmetros e comparação par a par** Os pesos dos parâmetros foram definidos conforme as matrizes da Tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Matriz do peso dos parâmetros de nível 2

	A	B
A	1	3
B	1/3	1

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5: Matriz do peso dos parâmetros de nível 1

	C	D	E
C	1	1/5	3
D	5	1	9
E	1/3	1/9	1

Fonte: Elaboração própria

A diagonal principal da matriz possui sempre valor igual a 1, pois se refere à comparação do mesmo critério. Já para as demais células os valores podem ser diferentes. Na Tabela 4, por exemplo, a importância do parâmetro A é 3 vezes superior ao parâmetro B.

**Síntese dos pesos** Antes de calcular a síntese dos pesos é necessário verificar a consistência dos pesos dos parâmetros atribuídos na etapa anterior. Pode ocorrer, por exemplo, se  $A > B$  e  $B > C$  seria inconsistente afirmar que  $A < C$ .

Inicialmente é necessário calcular o *auto vetor principal* e o *máximo auto valor*. Será apresentado somente o exemplo da matriz comparação dos parâmetros C, D e E (Tabela 5). O mesmo procedimento deve ser feito para a matriz comparação dos parâmetros A e B (Tabela 4).

O *auto vetor principal* é a somada da divisão de cada elemento da matriz pelo somatório da coluna a quem este pertence (Tabela 6). Após isso os valores de cada parâmetro são somados e divididos pelo número de parâmetros (Tabela 7).

Tabela 6: Cálculo da matriz normalizada

	C	D	E	Matriz normalizada		
C	1	1/5	3	$1/6,33 = 0,157$	$1/5 / 1,31 = 0,152$	$3 / 13 = 0,230$
D	5	1	9	$5 / 6,33 = 0,789$	$1 / 1,31 = 0,763$	$9 / 13 = 0,692$
E	1/3	1/9	1	$1/3 / 6,33 = 0,052$	$1/9 / 1,31 = 0,084$	$1 / 13 = 0,076$
Soma	6,33	1,31	13,00			

Fonte: Elaboração própria

Tabela 7: Cálculo do auto vetor principal

Auto vetor principal	
<b>C</b>	$(0,157+0,152+0,230) / 3 = \mathbf{0,179}$
<b>D</b>	$(0,789+0,763+0,692) / 3 = \mathbf{0,748}$
<b>E</b>	$(0,052+0,084+0,076) / 3 = \mathbf{0,070}$

Fonte: Elaboração própria

O *máximo auto valor* ( $\lambda_{\max}$ ) é a soma da multiplicação do auto vetor principal pelo valores da soma das colunas, conforme Equação 7.

$$\lambda_{\max} = [(0,179 * 6,33) + (0,748 * 1,31) + (0,070 * 13,00)] = 3,02 \quad (7)$$

Conforme [Saaty e Vargas \(2012\)](#), o índice de consistência é dado pela Equação 8. Onde  $n$  é a quantidade de parâmetros avaliados.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

Assim, o resultado do valor de CI do exemplo é dado pela Equação 9.

$$CI = \frac{3,02 - 3}{3 - 1} = 0,011475 \quad (9)$$

Após o cálculo do CI passa-se para a definição do valor do índice de aleatoriedade (CR), dado pela Equação 10. O CR precisa possuir valor menor que 0,1. Caso o valor do CR for superior à 0,1 é necessária uma reavaliação dos valores da matriz de comparação.

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,1(10\%) \quad (10)$$

O valor de RI é obtido na Tabela 8 em função do número de células ( $n$ ) proposto na matriz de comparação.

Tabela 8: Valor do RI

Número de parâmetros (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor de RI	0	0	0,52	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de [SAATY; VARGAS \(2012\)](#)

Assim, o resultado do valor de CI do exemplo é dado pela Equação 11.

$$CR = \frac{0,01}{0,58} = 0,01978 < 0,1 \quad (11)$$

Como valor calculado é menor do que 0,1, a matriz comparação é considerada consistente.

A contribuição de cada parâmetro é o valor do *auto vetor principal* relativo a cada parâmetro, conforme calculado anteriormente. Os valores da contribuição se encontram nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9: Valores da contribuição dos parâmetros de nível 2

	<b>Auto vetor principal</b>	<b>Contribuição</b>
<b>A</b>	0,75	75,00%
<b>B</b>	0,25	25,00%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10: Valores da contribuição dos parâmetros de nível 2

	<b>Auto vetor principal</b>	<b>Contribuição</b>
<b>C</b>	0,179	17,90%
<b>D</b>	0,748	74,80%
<b>E</b>	0,070	7,00%

Fonte: Elaboração própria

Conforme a estruturação do AHP, os parâmetros C, D, e E estão vinculados ao parâmetro A. Assim o síntese dos pesos finais são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Síntese dos pesos dos parâmetros

<b>Parâmetro</b>	<b>Auto vetor principal</b>	<b>Contribuição</b>
<b>A</b>	<b>0,75</b>	<b>75%</b>
C	$0,75 * (0,179) = \mathbf{0,1343}$	13,43%
D	$0,75 * (0,748) = \mathbf{0,5610}$	56,10%
E	$0,75 * (0,07) = \mathbf{0,0530}$	5,30%
<b>B</b>	<b>0,25</b>	<b>25%</b>

Fonte: Elaboração própria

O resultado forma uma equação que representa as contribuições de cada parâmetro no resultado final.

$$\begin{aligned} \text{Resultado} = & 0,1342 * (\text{ParametroC}) + 0,561 * (\text{ParametroD}) + 0,0525 * \\ & (\text{ParametroE}) + 0,25(\text{ParametroB}) \quad (12) \end{aligned}$$

Podemos interpretar os parâmetros B, C, D, e E como camadas geográficas. Assim, fica claro que, a equação Resultado (Equação 12) pode ser usada para a soma dessas camadas por meio da álgebra de mapas, levando em consideração o peso de cada parâmetro.

Voltando aos dados e parâmetros do estudo, aplicando o AHP no hierarquia proposta por Lopes (2015) obtemos a síntese dos pesos da Tabela 12, isto é, a contribuição de cada parâmetro no resultado final.



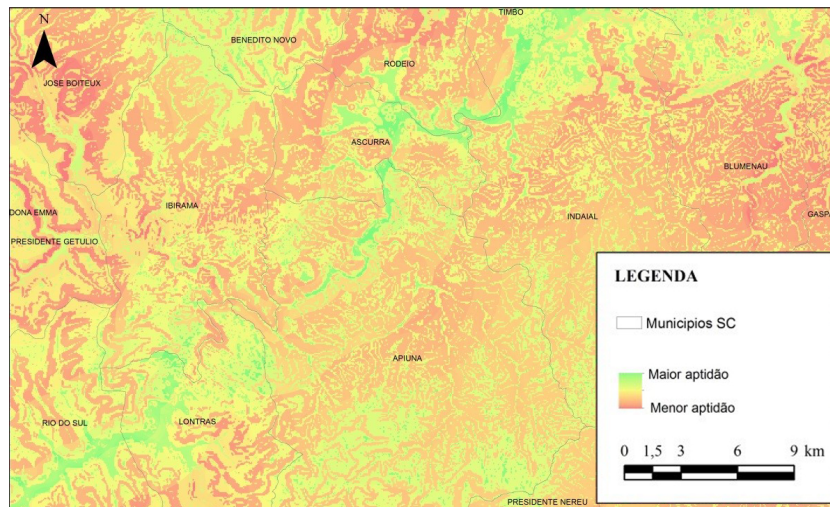
Tabela 12: Contribuição de cada parâmetro no resultado final

<b>Parâmetro</b>	<b>Contribuição (%)</b>
<b>TÉCNICO</b>	<b>70,14</b>
<b>Declividade</b>	<b>35,26</b>
<b>Hidrografia</b>	<b>4,75</b>
Rios principais	3,63
Rios secundários	0,78
Áreas inundáveis	0,33
<b>Acessos</b>	<b>18,25</b>
Rodovias principais	12,20
Rodovias secundárias	4,43
Ferrovias	1,61
<b>Área urbana</b>	<b>9,42</b>
<b>Geotécnica</b>	<b>2,44</b>
<b>AMBIENTAL</b>	<b>8,53</b>
<b>Áreas Protegidas</b>	<b>2,23</b>
Unidade Conservação de Proteção Integral	0,43
Zona de Amortecimento de Unidade Conservação	0,18
Áreas de Preservação Permanente	1,62
<b>Distanciamentos Legais</b>	<b>5,08</b>
Distanciamento de Terra Indígena	2,54
Distanciamento de Terra Quilombola	2,54
<b>Áreas Prioritárias para Conservação</b>	<b>0,46</b>
<b>Assentamento Rural</b>	<b>0,77</b>
<b>SOCIOECONÔMICO</b>	<b>21,32</b>
<b>Lavouras Temporárias</b>	<b>13,34</b>
Soja	8,02
Trigo	1,79
Milho	3,52
<b>Lavouras Permanentes</b>	<b>4,70</b>
<b>Rebanhos</b>	<b>3,26</b>
Suínos	0,90
Bovinos	1,53
Galinhas	0,82

Fonte: Elaboração própria

Por meio da álgebra dos mapas, com os insumos dos dados geográficos e da contribuição de cada parâmetro, é gerado o resultado do AHP aplicado geograficamente. A Figura 21 mostra o mapa do resultado do AHP na região estudada. Ela apresenta em verde as regiões mais propícias a receber o traçado, enquanto que em vermelho as menos propícias.

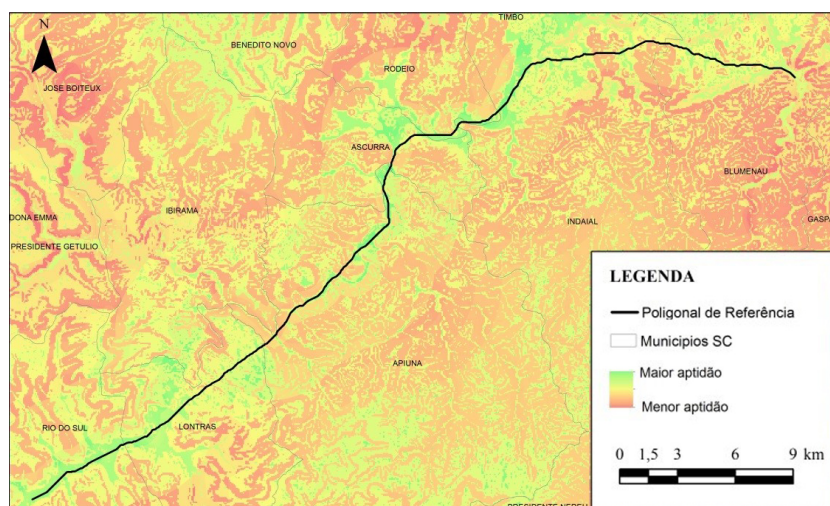
Figura 21: Camada resultado do AHP na região de estudo



Fonte: Elaboração própria

Enfim, a definição da diretriz de referência é feita com a aplicação das funções *r.cost* e *r.drain* do *GRASSGIS*. O *r.cost* cria a superfície de custos entre os pontos de origem e destino da futura diretriz, já o *r.drain* determina o caminho de mínimo custo entre os pontos. A Figura 22 traz o resultado da aplicação das funções, gerando, assim, a diretriz de referência.

Figura 22: Diretriz de referência



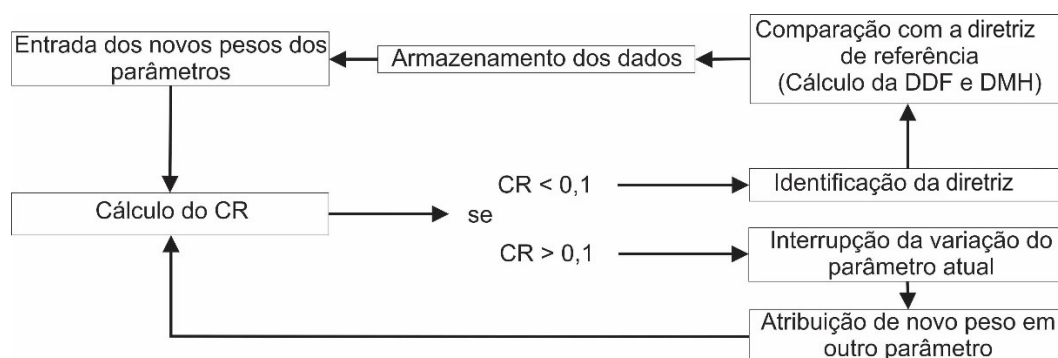
Fonte: Elaboração própria

Para a execução da Etapa 2 foram utilizados os scripts disponíveis no estudo de [Lopes \(2015\)](#), que automatizam o método descritos nessa etapa.

### 4.3 ETAPA 3 – VARIAÇÃO DOS PESOS DOS PARÂMETROS

A Etapa 2 é repetida sequencialmente na Etapa 3, com a diferença que o peso dos parâmetros nas matrizes do AHP é variado, assim são geradas diretrizes diferentes da diretriz de referência. O fluxograma da Figura 23 representa o método de variação do peso dos parâmetros e comparação das diretrizes feito pelo script do APÊNDICE B.

Figura 23: Fluxograma do método de variação do peso dos parâmetros e comparação das diretrizes



Fonte: Elaboração própria

O AHP define que os pesos são definidos sempre em pares, ou seja, um parâmetro deve ter seu peso definido em relação a outro parâmetro. Assim, os parâmetros são variados sempre em pares, por exemplo, sempre que aumenta o peso de um parâmetro consequentemente se diminui o peso de outro. A entrada dos pesos dos parâmetros no algoritmo é feita por meio de um arquivo *.xls*. Um exemplo da variação dos parâmetros pode ser visto nas Tabelas 13 e 14. A Tabela 13 mostra os pesos originais, enquanto que a 14 mostra os pesos modificados. A variação dos pesos está destacada em negrito.

Tabela 13: Matriz com os pesos originais

	Técnico	Ambiental	Socioeconômico
Técnico	1	7	<b>4</b>
Ambiental	0,142	1	0,333
Socioeconômico	<b>0,25</b>	3	1

Fonte: (LOPES, 2015)

Tabela 14: Matriz com os pesos modificados

	Técnico	Ambiental	Socioeconômico
Técnico	1	7	<b>2,1</b>
Ambiental	0,142	1	0,333
Socioeconômico	<b>0,476</b>	3	1

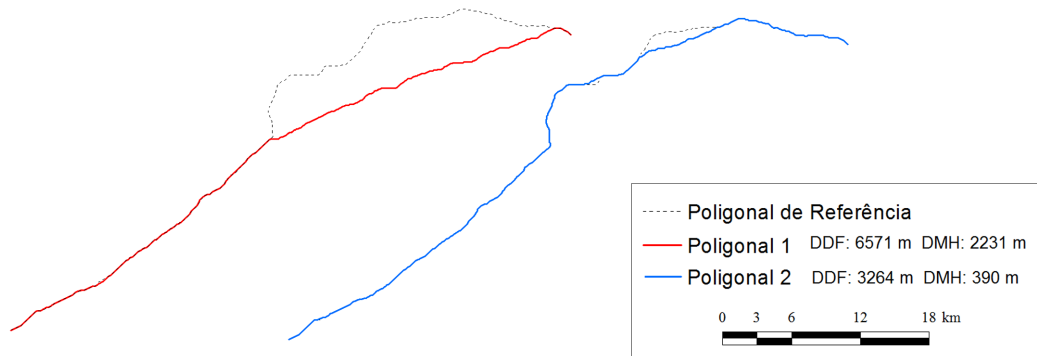
Fonte: (LOPES, 2015)

Os parâmetros foram variados em 0,1 para cima e para baixo, o número de variações é limitado pelo CR. No AHP o CR nunca deve ser superior a 0,1. A variação é interrompida assim que o CR ultrapassa o limite.

Ao parâmetro que a variação foi controlada (aquele que varia em 0,1) foi atribuído o nome de parâmetro principal, aquele que tem sua variação dependente da variação do parâmetro principal foi chamado de parâmetro secundário. No exemplo da Tabela 14, o parâmetro principal é o técnico, já o socioeconômico é o parâmetro secundário.

O AHP é aplicado logo após a verificação do limite do CR, de modo similar à Etapa 2, gerando a nova diretriz. Essa nova diretriz é comparada com a diretriz de referência. Nessa etapa são calculadas as Distância Discreta de Fréchet (DDF) e a Distância Modificada de Hausdorff (DMH). A Figura 24 mostra exemplos de resultados de DDF e DMH, bem como a representação visual das diretrizes.

Figura 24: Comparação de diretriz e seus valores de DDF e DMH



Fonte: Elaboração própria

A Polígono 1 da figura possui maior discrepância com a Polígono de referência, possuindo, assim, valores maiores de DDF e DMH. Já a Polígono 2 possui menores valores de DDF e DMH e apresenta maior semelhança em relação a curva de referência.

Os resultados são armazenados em um banco de dados contendo os parâmetros variados, os novos valores dos parâmetros primários e secundários, o valor do CR, bem como, as DDFs e DMHs.

A Figura 25 mostra a configuração do banco de dados. A coluna *sheet* corresponde a planilha do *Excel* onde os dados dos pesos dos parâmetros foram obtidos. *a\_rel* e *b\_rel* correspondem aos parâmetros primários e secundários consecutivamente, enquanto *a\_valor* e *b\_valor* são os valores dos novos pesos dos parâmetros primários e secundários naquela iteração. *CR* é o Índice de Aleatoriedade, *frechet* é a Distância Discreta de Fréchet (DDR) e *hausdorff* é a Distância Modificada de Hausdorff.

Figura 25: Banco de dados gerado na Etapa 3

Estrutura do banco de dados    Navegar dados    Editar Pragmas    Executar SQL								
Tabela: resultados								
	sheet	a_rel	b_rel	a_valor	b_valor	cr	frechet	hausdorff
	Filtro	Filtro	Filtro	Fil...	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro
6029	3-Resultado	TeP	AbP	5.0	0.2	0.0824440331019	1219.91058683	32.3790079138
6030	3-Resultado	TeP	AbP	4.9	0.204081632653	0.0863228068632	1219.91058683	33.0814220527
6031	3-Resultado	TeP	AbP	4.8	0.208333333333	0.0903755266195	1219.91058683	33.4551431939
6032	3-Resultado	TeP	AbP	4.7	0.212765957447	0.0946117141157	1219.91058683	33.6580397525
6033	3-Resultado	TeP	AbP	4.6	0.217391304348	0.0990416103564	1219.91058683	33.6580397525
6034	3-Resultado	TeP	SeP	4.0	0.25	0.0312100418526	0.0	0.0
6035	3-Resultado	TeP	SeP	4.1	0.243902439024	0.0341366182457	184.366986513	2.49864003318
6036	3-Resultado	TeP	SeP	4.2	0.238095238095	0.0371205081687	501.11044488	8.04167784189
6037	3-Resultado	TeP	SeP	4.3	0.232558139535	0.0401562268539	501.11044488	9.20938916079
6038	3-Resultado	TeP	SeP	4.4	0.227272727273	0.0432387976537	501.11044488	9.41357917535
6039	3-Resultado	TeP	SeP	4.5	0.222222222222	0.0463636974195	501.11044488	14.5895461608
6040	3-Resultado	TeP	SeP	4.6	0.217391304348	0.0495268086866	501.11044488	14.045257237
6041	3-Resultado	TeP	SeP	4.7	0.212765957447	0.0527243776982	501.11044488	13.8502035611

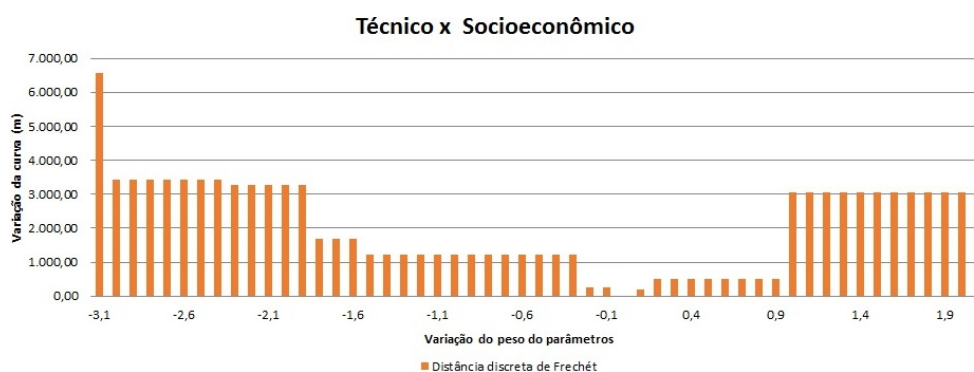
Fonte: Elaboração própria

Foram efetuadas 6101 variações o que resultou, portanto, em um banco de dados com o mesmo número de linhas. O tempo de processamento da Etapa 3 foi de 2 dias, 9 horas, 57 minutos e 45 segundos. O procedimento foi rodado em um computador com processador de 2.8 GHz *Intel Core i7*, memória de 16 GB 1333 MHz DDR3, armazenamento de 240 GB *Solid State SATA Drive* e sistema operacional *Mac OS X*.

#### 4.4 ETAPA 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o banco de dados obtido na Etapa 3 foram produzidos os gráficos e mapas que auxiliaram na interpretação dos resultados. Um exemplo de gráfico é apresentado na Figura 26.

Figura 26: Exemplo de gráfico



Fonte: Elaboração própria

O eixo X indica a variação do parâmetro e o eixo Y indica as distâncias (DDF ou DMH) entre a diretriz de referência e a diretriz gerada na variação indicada no eixo X.

Nem todas as diretrizes obtidas na Etapa 3 podem ser visualizadas facilmente nos mapas. Algumas apresentam valores baixos de DDF e DMH indicando, assim, que essas diretrizes são bem próximas da diretriz de referência. Portanto, para facilitar e agilizar o processo de obtenção dos mapas selecionou-se os valores de variação dos parâmetros que apresentavam maior sensibilidade na diretriz, ou seja, aqueles com maiores distâncias de DDF e DMH. Outro critério utilizado é que, em alguns casos, na variação dos parâmetros, os valores de DDF e DMH se mostravam constantes, indicando que a diretriz gerada era a mesma, assim foram selecionados somente valores que apareciam na menor variação, desconsiderando as diretrizes das variações de maior valor. Resumindo, foram selecionados as diretrizes que apresentavam DDF maior que 500 metros na ocorrência da menor variação do parâmetro.

A Figura 27 exemplifica o processo, em verde estão os dados dos pesos originais e em amarelo os dados selecionados.

Figura 27: Seleção no banco de dados das diretrizes à serem exportadas

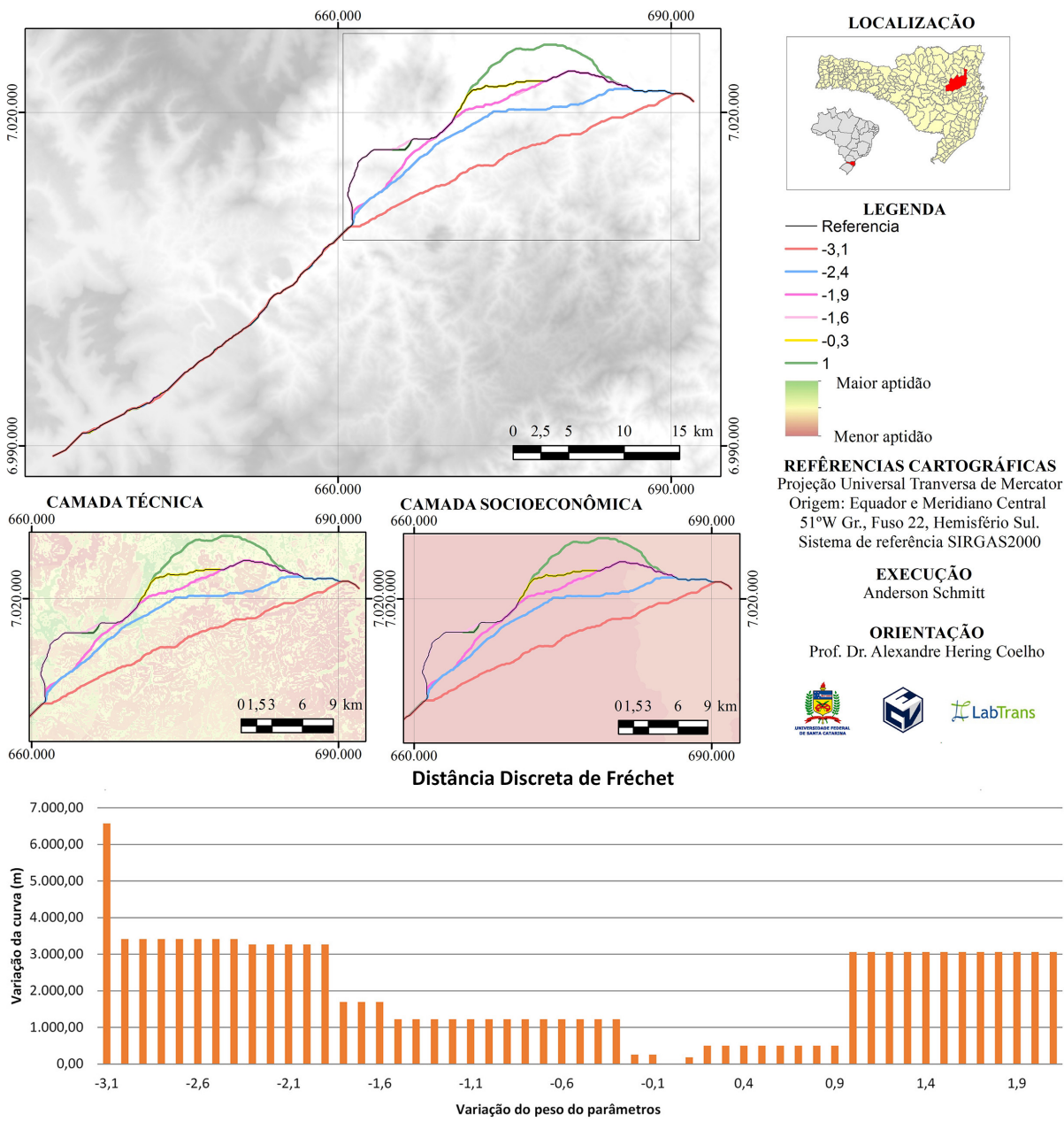
nível	parâmetro primário	parâmetro secundário	1_valor	2_valor	cr	frechet	hausdorff	Variação
3-Resultado	TeP	SeP	2,4	0,416666667	0,00015009	1.687	198	-1,6
3-Resultado	TeP	SeP	2,5	0,4	0,00057564	1.220	57	-1,5
3-Resultado	TeP	SeP	2,6	0,384615385	0,00131999	1.220	57	-1,4
3-Resultado	TeP	SeP	2,7	0,37037037	0,00234678	1.220	57	-1,3
3-Resultado	TeP	SeP	2,8	0,357142857	0,00362451	1.220	45	-1,2
3-Resultado	TeP	SeP	2,9	0,344827586	0,00512582	1.220	38	-1,1
3-Resultado	TeP	SeP	3	0,333333333	0,00682678	1.220	35	-1
3-Resultado	TeP	SeP	3,1	0,322580645	0,00870642	1.220	33	-0,9
3-Resultado	TeP	SeP	3,2	0,3125	0,01074628	1.220	34	-0,8
3-Resultado	TeP	SeP	3,3	0,303030303	0,01293005	1.220	32	-0,7
3-Resultado	TeP	SeP	3,4	0,294117647	0,01524329	1.220	31	-0,6
3-Resultado	TeP	SeP	3,5	0,285714286	0,01767313	1.220	31	-0,5
3-Resultado	TeP	SeP	3,6	0,277777778	0,02020813	1.220	33	-0,4
3-Resultado	TeP	SeP	3,7	0,27027027	0,02283804	1.220	33	-0,3
3-Resultado	TeP	SeP	3,8	0,263157895	0,02555369	251	3	-0,2
3-Resultado	TeP	SeP	3,9	0,256410256	0,02834683	251	2	-0,1
3-Resultado	TeP	SeP	4	0,25	0,03121004	0	0	0
3-Resultado	TeP	SeP	4,1	0,243902439	0,03413662	184	2	0,1
3-Resultado	TeP	SeP	4,2	0,238095238	0,03712051	501	8	0,2
3-Resultado	TeP	SeP	4,3	0,23255814	0,04015623	501	9	0,3
3-Resultado	TeP	SeP	4,4	0,227272727	0,0432388	501	9	0,4
3-Resultado	TeP	SeP	4,5	0,222222222	0,0463637	501	15	0,5
3-Resultado	TeP	SeP	4,6	0,217391304	0,04952681	501	14	0,6
3-Resultado	TeP	SeP	4,7	0,212765957	0,05272438	501	14	0,7
3-Resultado	TeP	SeP	4,8	0,208333333	0,05595298	501	13	0,8
3-Resultado	TeP	SeP	4,9	0,204081633	0,05920948	501	13	0,9

Fonte: Elaboração própria

As diretrizes desses valores foram importadas no software *ArcMap*, onde os mapas foram produzidos. Além das diretrizes geradas, utilizou-se os dados geográficos dos parâmetros pesquisados na Etapa 1. Um exemplo de mapa produzido é apresentado na Figura 28.



Figura 28: Exemplo de mapa produzido



Fonte: Elaboração própria

Todos os mapas produzidos se encontram no APÊNDICE B.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi feita uma análise sem a visualização geográfica, ou seja, sem o uso da análise obtida dos mapas. Foi utilizado, portanto, somente o banco de dados que apresenta os valores de variações e as distâncias de comparações (DDF e DMH).

Foram utilizados filtros no banco de dados com o objetivo de encontrar os parâmetros que causam maior sensibilidade no traçado. O primeiro filtro está na coluna variação, foram filtrados somente valores de variação nos parâmetros entre  $-1$  e  $+1$ , excluindo valores fora dessa faixa. O segundo filtro foi feito na coluna de valores de DDF, onde foram filtrados somente valores acima de 500 metros, excluindo distâncias menores.

$$\begin{aligned} &\text{Filtros utilizados:} \\ &-1 \leq \text{Variação} \leq +1 \\ &\text{DDF} \geq 500 \end{aligned}$$

A Tabela 15 mostra o resultado dos filtros no banco de dados.

Tabela 15: Parâmetros que provocaram as maiores sensibilidades

<b>Variação</b>	<b>Parâmetro principal</b>	<b>Parâmetro secundário</b>	<b>DDF</b> (metros)	<b>DMH</b> (metros)
-0,1	Hidrografia	Acessos	3.060,0	418,6
-0,1	Ambiental	Socioeconômico	1.219,9	32,7
+0,1	Ambiental	Socioeconômico	501,1	15
+0,1	Hidrografia	Acessos	501,1	12,7
+0,1	Hidrografia	Área Urbana	501,1	9,2
+0,2	Hidrografia	Acessos	1.219,9	41,1
+0,2	Hidrografia	Área Urbana	1.219,9	22,4
+0,2	Hidrografia	Solos	501,1	7,6
+0,2	Técnico	Socioeconômico	501,1	8,0
+0,3	Ambiental	Socioeconômico	3.060,0	426,2
-0,3	Técnico	Socioeconômico	1.219,9	33,2
-0,3	Declividade	Hidrografia	501,1	7,4
-0,4	Declividade	Acessos	1.219,9	27,6
+0,4	Técnico	Ambiental	501,1	9,2
-0,6	Declividade	Área Urbana	1.219,9	27,0
+0,6	Rios Principais	Rios Secundários	501,1	7,4
-0,8	Declividade	Hidrografia	1.219,90	33,9
-0,8	Área Urbana	Solos	501,1	8,6
+1,0	Técnico	Socioeconômico	3.060,00	423,4
-1,0	Técnico	Ambiental	1.219,9	33,2
-1,0	Rodovias Principais	Rodovias Secundárias	611,8	14,3

Fonte: Elaboração própria



Nota-se que o parâmetro hidrografia foi o que causou maior sensibilidade na diretriz, foram 3060 metros DDF em uma variação de apenas  $-0,1$ . O parâmetro ambiental foi outro que se mostrou sensível mesmo em pequenas variações. Outros parâmetros do nível três do AHP apresentaram grande sensibilidade, como o técnico e o socioeconômico.

Outro dado obtido através da consulta direta ao banco de dados foi o número de ocorrências dos parâmetros utilizando filtros de variações entre  $-1$  a  $+1$  e distâncias acima de 250 metros. Com a contagem da ocorrência de cada parâmetro é possível visualizar quais os parâmetros que mais provocam sensibilidade na curva.

Filtros utilizados:

$$-1 \leq \text{Variação} \leq +1$$

$$\text{DDF} \geq 250$$

Após a aplicação do filtro, foram contadas a ocorrência de cada parâmetro. As Tabelas 16 e 17 apresentam os resultados.

Tabela 16: Número de ocorrências dos parâmetros principais

Parâmetro	Ocorrências
Declividade	8
Hidrografia	7
Técnico	7
Ambiental	3
Rios Principais	3
Rodovias Principais	3
Acessos	2
Área Urbana	2
Rios Secundários	1

Fonte: Elaboração própria

Tabela 17: Número de ocorrências dos parâmetros secundários

Parâmetro	Ocorrências
Acessos	6
Geotécnica	6
Área Urbana	4
Ambiental	3
Hidrografia	3
Áreas Inundáveis	2
Rios Secundários	2
Rodovias Secundárias	2
Ferrovias	1

Fonte: Elaboração própria

Nos parâmetros principais (Tabela 16), declividade foi o parâmetro com maior número de ocorrências, aparecendo oito vezes, seguido por hidrografia e técnico com sete

ocorrências. Já nos parâmetros secundários (Tabela 17), acessos e geotécnica apareceram seis vezes e área urbana quatro.

A análise dos dados mostrou que os parâmetros do grupo técnico foram o que mais provocaram variações na diretriz. Oito dos nove parâmetros principais que provocaram as maiores sensibilidades são do grupo técnico, o mesmo número é encontrado nos parâmetros secundários.

Em um banco de dados de 6101 linhas, os filtros utilizados na análise inicial se mostraram de grande ajuda, pois informaram rapidamente quais os parâmetros geraram as maiores sensibilidades no traçado.

No entanto, uma análise mais aprofundada se mostra necessária para detectar o comportamento do traçado com a variação dos pesos, essa análise só é possível com a visualização geográfica por meio de mapas e comparações com as camadas de dados geográficos.

## 5.1 PARÂMETROS AMBIENTAIS

A Tabela 21 apresenta os parâmetros ambientais usados na AHP, as porcentagens de contribuição de cada parâmetro nos pesos originais, bem como, as porcentagens de contribuição que ocorreram na variação dos pesos.

Tabela 18: Parâmetros ambientais e suas contribuições

Parâmetro	Contribuição (%)	Variação (%)
<b>Ambiental</b>	<b>8,53</b>	<b>6,33 a 14,67</b>
<b>Áreas Protegidas</b>	<b>2,23</b>	<b>1,60 a 4,16</b>
Unidade Conservação de Proteção Integral	0,43	-
Zona de Amortecimento de Unidade Conservação	0,18	-
Áreas de Preservação Permanente	1,62	-
<b>Distanciamentos Legais</b>	<b>5,08</b>	<b>3,05 a 6,01</b>
Distanciamento de Terra Indígena	2,54	-
Distanciamento de Terra Quilombola	2,54	-
<b>Áreas Prioritárias para Conservação</b>	<b>0,46</b>	<b>0,21 a 0,87</b>
<b>Assentamento Rural</b>	<b>0,77</b>	<b>0,50 a 1,20</b>

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que a porcentagem de contribuição dos parâmetros ambientais é baixa. Isso acontece devido ao baixo peso atribuído no terceiro nível do AHP ao parâmetro ambiental, que representa apenas 8,53% do resultado.

Os parâmetros unidade de conservação de proteção integral, zona de amortecimento

de unidade de conservação, áreas de preservação permanente, distanciamento de terra indígena e distanciamento de terra quilombola não geraram nenhuma variação na diretriz.

Nenhuma das DDFs apresentou valor maior que 254 metros. Portanto, as diretrizes geradas quase não apresentaram diferenças da diretriz de referência.

Uma melhor avaliação da sensibilidade causada pelos parâmetros ambientais pode ser feita aumentando o peso dos parâmetro ambiental no Nível 3 do AHP antes de variar os pesos dos parâmetros de nível mais baixo.

Todos os gráficos das DDFs, DMHs, bem como os mapas dos parâmetros ambientais se encontram no APÊNDICE A.

## 5.2 PARÂMETROS SOCIOECONÔMICOS

Ao contrário dos parâmetros ambientais, os parâmetros socioeconômicos apresentaram contribuição maior no resultado final. Conforme a Tabela 19 a contribuição do parâmetro socioeconômico no nível três do AHP é de 21,32%, a soja possui 8,02% e lavouras permanentes 4,70%, os demais parâmetros possuem baixa contribuição.

Mesmo com uma contribuição relativamente grande, os parâmetros socioeconômicos não geraram nenhuma variação na diretriz, ou seja, todas as DDFs e DMHs apresentaram valor zero.

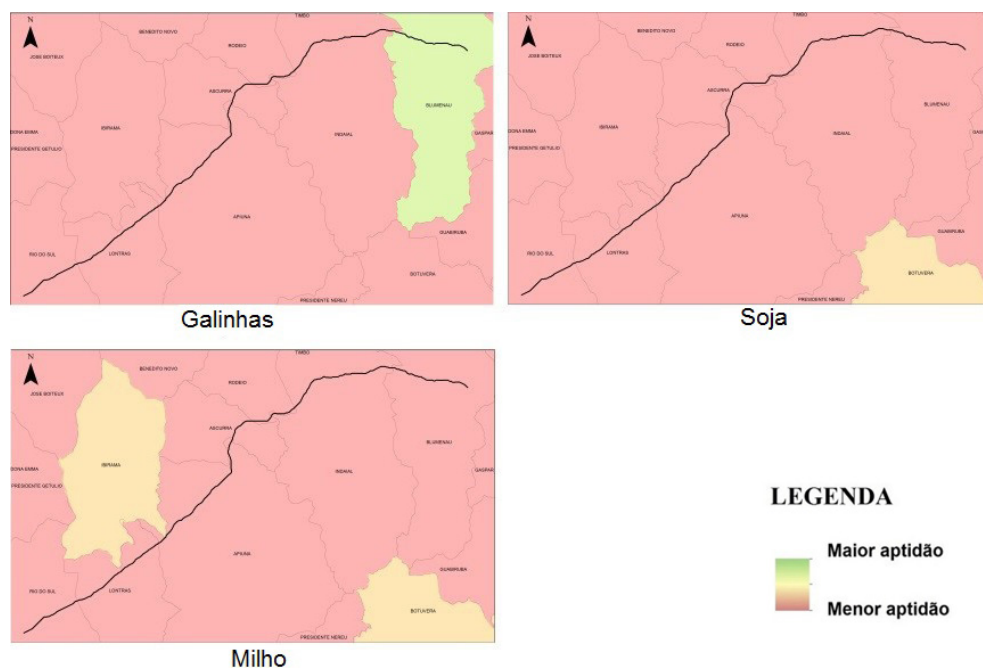
Tabela 19: Parâmetros socioeconômicos e suas contribuições

Parâmetro	Contribuição (%)	Variação (%)
<b>Socioeconômico</b>	<b>21,32</b>	-
<b>Lavouras Temporárias</b>	<b>13,34</b>	-
Soja	8,02	-
Trigo	1,79	-
Milho	3,52	-
<b>Lavouras Permanentes</b>	<b>4,70</b>	-
<b>Rebanhos</b>	<b>3,26</b>	-
Suínos	0,90	-
Bovinos	1,53	-
Galinhas	0,82	-

Fonte: Elaboração própria

A Figura 29 mostra as camadas dos parâmetros socioeconômicos presentes na área de estudo, são eles soja, milho e galinhas. Os parâmetros não representados na Figura 29 não estão presentes na área estudada.

Figura 29: Parâmetros socioeconômicos presentes na área de estudo



Fonte: Elaboração própria

Analisando os dados geográficos dos parâmetros é possível perceber que, ou os dados não estão presentes na área de estudo (possuem o mesmo valor em todas as células do RASTER) ou as áreas propícias (áreas de produção) estão muito afastadas da diretriz. Vale ressaltar que originalmente no trabalho de [Lopes \(2015\)](#) as camadas socioeconômicas são grandes áreas classificadas, geralmente por municípios.

Logo, a não presença, a pouca aptidão das camadas, além da baixa contribuição da maioria dos parâmetros no resultado final, contribuíram para que não ocorresse variação na diretriz.

### 5.3 PARÂMETROS TÉCNICOS

Como pode ser visto na Tabela 20, os parâmetros técnicos são os que apresentam maior porcentagem de contribuição no resultado final, uma vez que o parâmetro técnico representa 70,14% da contribuição no Nível 3 do AHP. Por conta disso, os parâmetros técnicos foram os que causaram maiores variações na diretriz.

Tabela 20: Parâmetros técnicos e suas contribuições

<b>Parâmetro</b>	<b>Contribuição(%)</b>	<b>Variação(%)</b>
<b>TÉCNICO</b>	<b>70,14</b>	<b>49,43 a 74,80</b>
<b>Declividade</b>	<b>35,26</b>	<b>24,67 a 42,86</b>
<b>Hidrografia</b>	<b>4,75</b>	<b>3,22 a 7,87</b>
Rios principais	3,63	3,31 a 4,09
Rios secundários	0,78	0,70 a 3,68
Áreas inundáveis	0,33	0,13 a 0,70
<b>Acessos</b>	<b>18,25</b>	<b>13,69 a 28,26</b>
Rodovias principais	12,20	9,02 a 13,52
Rodovias secundárias	4,43	3,18 a 7,38
Ferrovias	1,61	1,26 a 2,58
<b>Área urbana</b>	<b>9,42</b>	<b>6,91 a 17,98</b>
<b>Geotécnica</b>	<b>2,44</b>	<b>1,20 a 4,11</b>

Fonte: Elaboração própria

A apresentação dos resultados seguirá a ordem dos níveis do AHP, começando pelos parâmetros do Nível 1 e posteriormente do Nível 2.

O Nível 1 é composto pelos parâmetros que compõem os acessos (rodovias principais, rodovias secundárias e ferrovias) e a hidrografia (rios principais, rios secundários e áreas inundáveis). Já o Nível 2 engloba os parâmetros declividade, hidrografia, acessos, áreas urbanas e geotécnica.

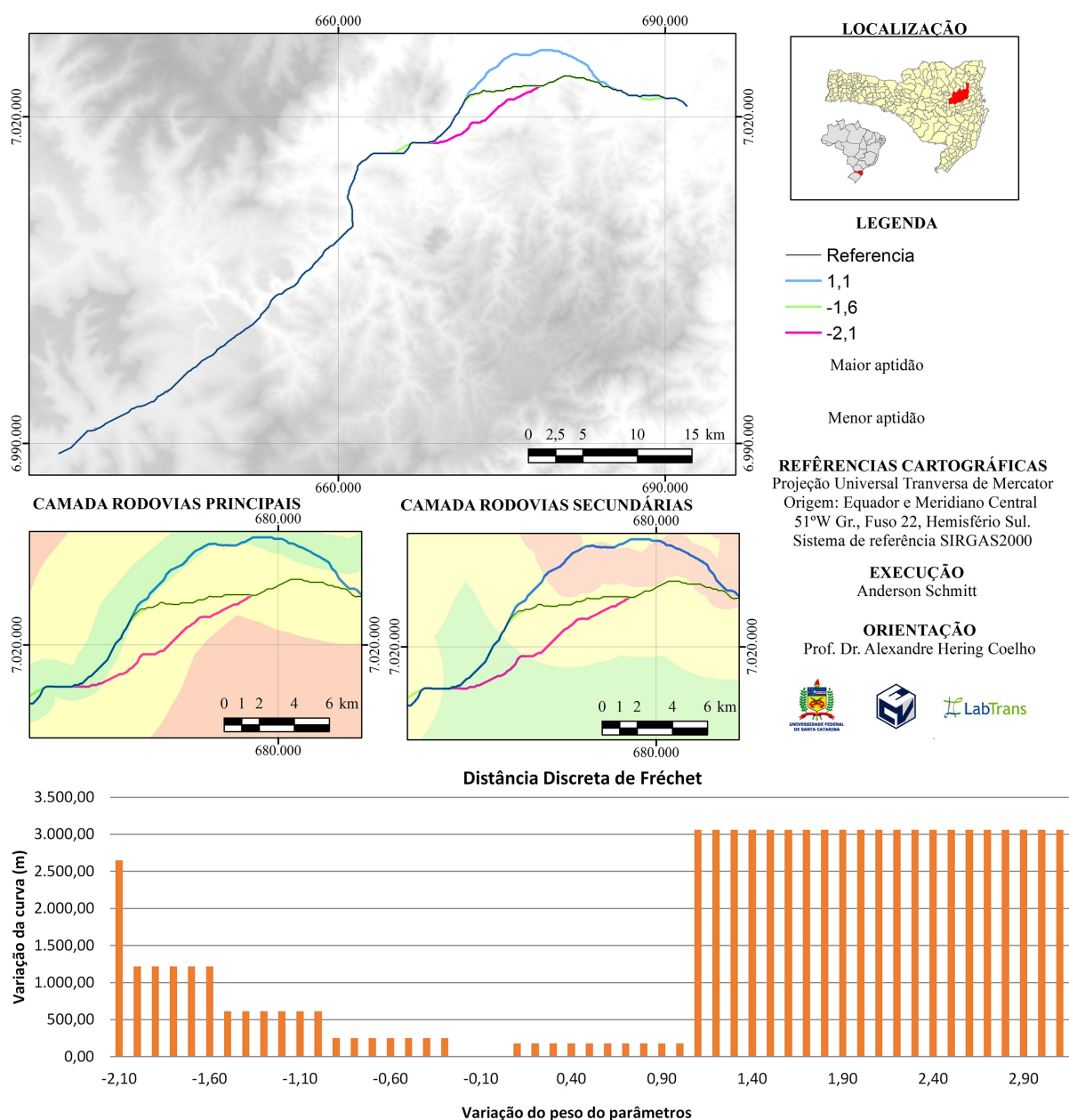
### 5.3.1 Nível 1

No nível 1 dos parâmetros de acessos foram variados os parâmetros:

- (a) rodovias principais em relação ao parâmetro rodovias secundárias;
- (b) rodovias secundárias em relação ao parâmetro ferrovias; e
- (c) rodovias principais em relação ao parâmetro ferrovias.

A Figura 30 mostra o resultado da variação do peso do parâmetro rodovias principais em relação ao parâmetro rodovias secundárias e as diretrizes geradas.

Figura 30: Mapa - rodovias principais x rodovias secundárias



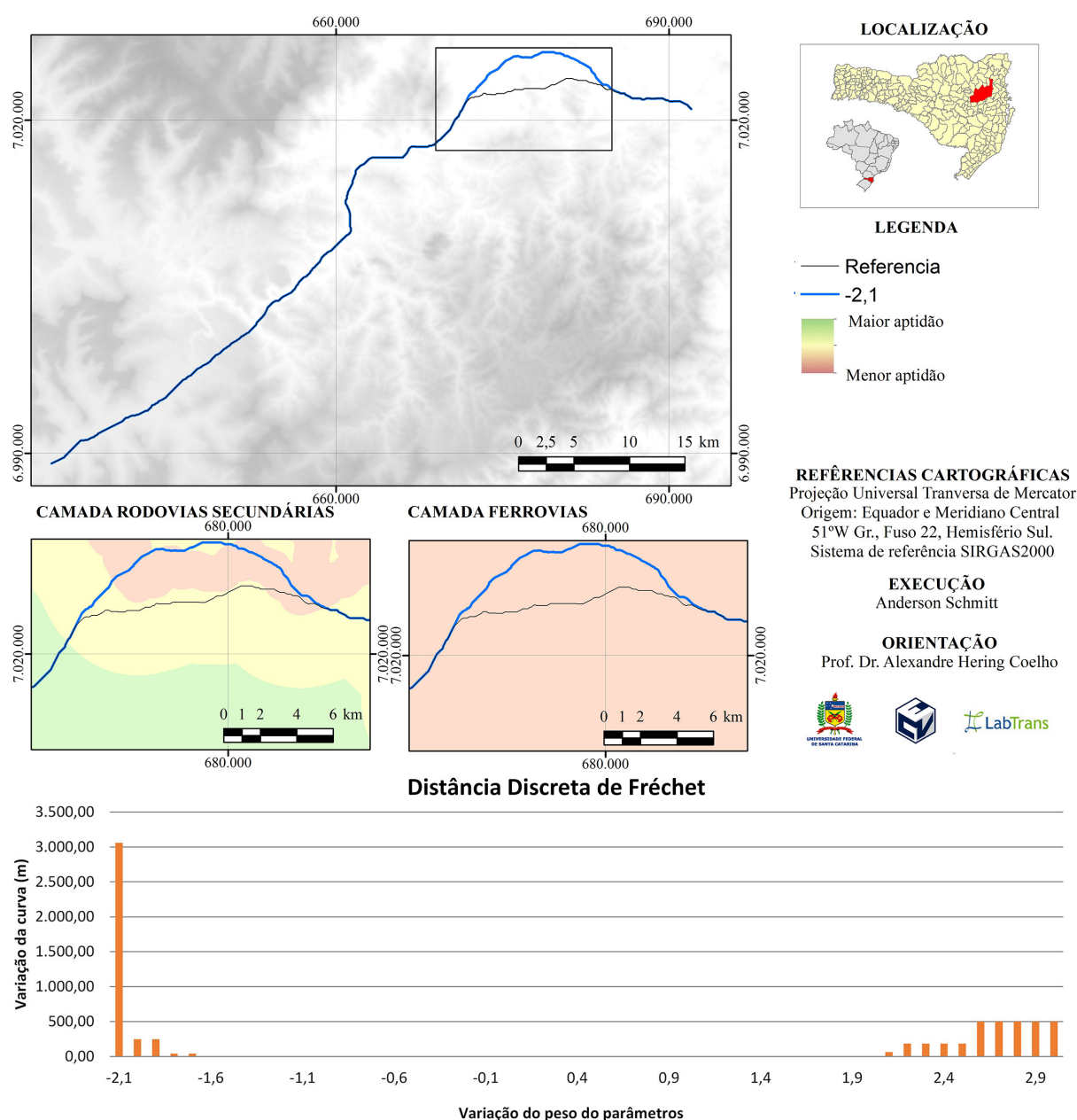
Fonte: Elaboração própria

Nota-se que variação de + 1,1 no peso do parâmetro rodovias principais fez com que a diretriz se aproximasse da área mais propícia da camada de mesmo nome, causando uma DDF de 3059 metros. Acima dos +1,1 o gráfico da DDF se mostra constante, o que indica que a curva permanece a mesma.

Já com as variações negativas, a diretriz tende a se afastar da camada de rodovias principais e se aproximar da área mais propícia das rodovias secundárias. Na variação -2,1, por exemplo, a distância da diretriz foi de 2647 metros de DDF, se afastando da camada rodovias principais.

A Figura 31 apresenta o resultado da variação do peso do parâmetro rodovias secundárias em relação ao parâmetro ferrovias. Não há na área de estudo nenhuma ferrovia, no entanto a diretriz apresentou uma grande modificação (3059 metros de DDF) quando o parâmetro rodovias secundárias teve sua importância reduzida em  $-2,1$ . Isso se deve ao fato de que, diminuindo o peso do parâmetro rodovias secundárias, se torna mais vantajoso para a diretriz atravessar as camadas propícias das rodovias principais, mesmo que o peso desta não tenha sido alterado.

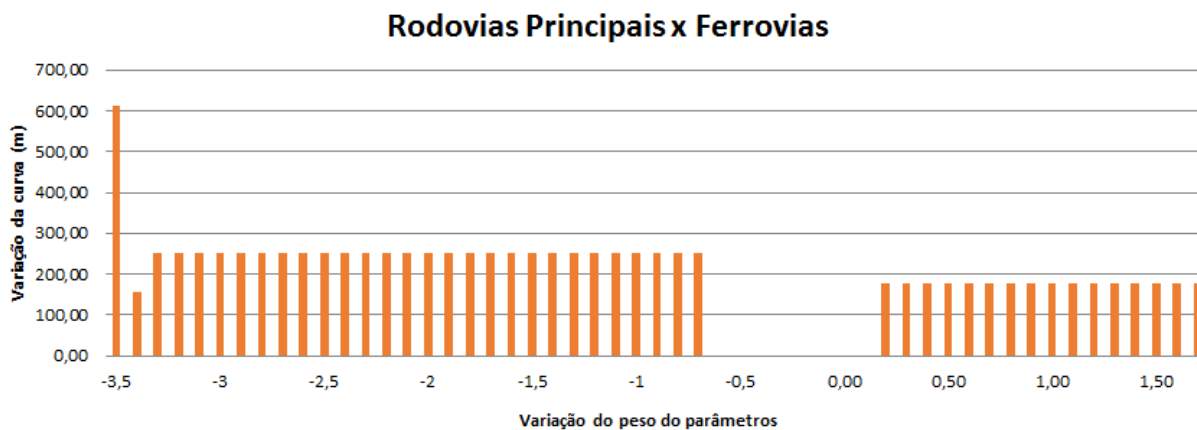
Figura 31: Mapa - rodovias secundárias x ferrovias



Com relação à variação do parâmetro rodovias principais em relação ao parâmetro

ferrovias, a diretriz apresentou pouca variação. Como pode ser visto na Figura 32, a maior distância foi de 611 metros DDF que foi obtida quando a importância do parâmetro rodovias principais foi reduzida em  $-3,5$ .

Figura 32: Gráfico de DDF - rodovias principais x ferrovias



Fonte: Elaboração própria

A sensibilidade considerável dos parâmetros de acesso pode ser explicada pela proximidade geográfica das camadas rodovias principais e rodovias secundárias. Fazendo com que a diretriz variasse entre as camadas mais propícias dos dois parâmetros.

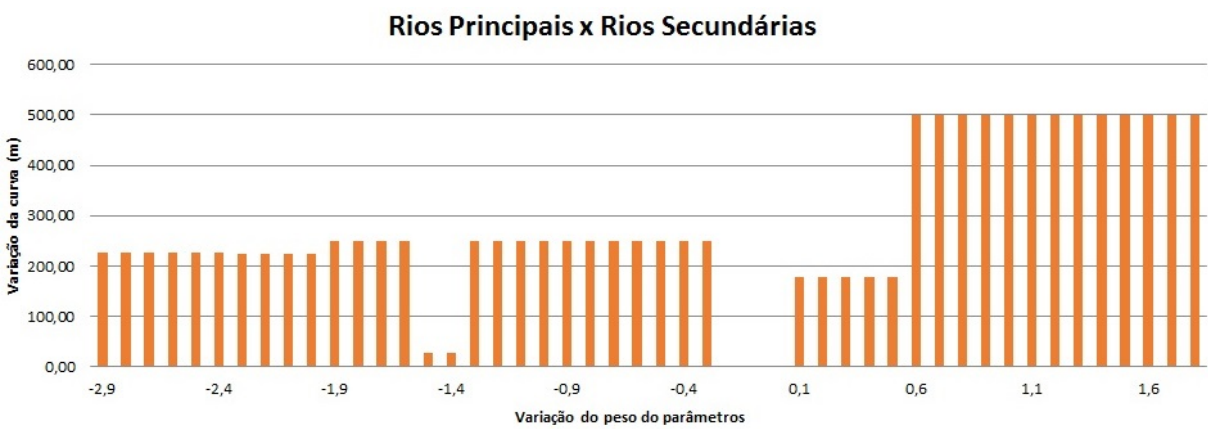
Com relação ao nível 1 dos parâmetros de hidrografia, foram variados:

- (a) rios principais em relação ao parâmetro rios secundários;
- (b) rios principais em relação ao parâmetro áreas inundáveis; e
- (c) rios secundários em relação ao parâmetro áreas inundáveis.

Conforme as Figuras 33 e 34, a variação no peso do parâmetros de hidrografia causam valores de DDF variando entre 250 e 500 metros.

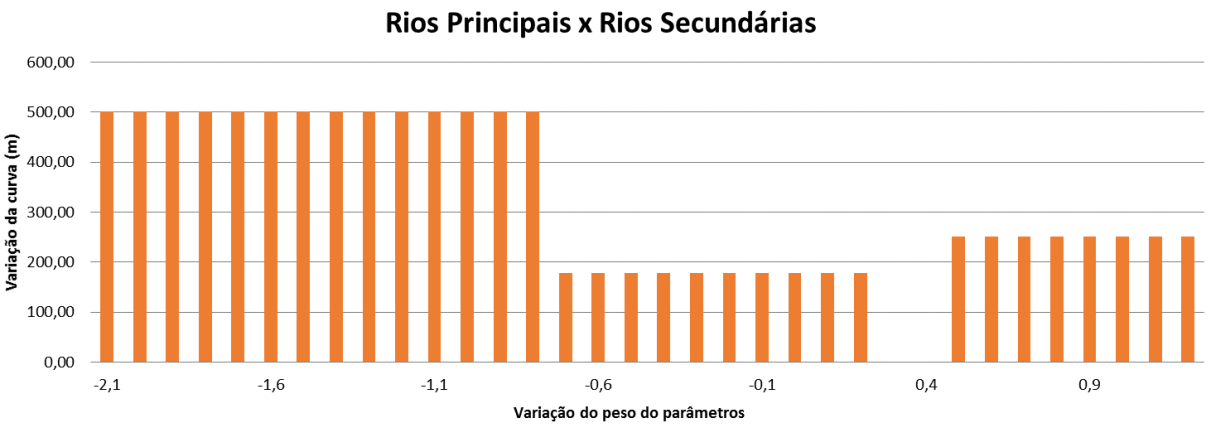


Figura 33: Gráfico de DDF - rios principais x rios Secundários



Fonte: Elaboração própria

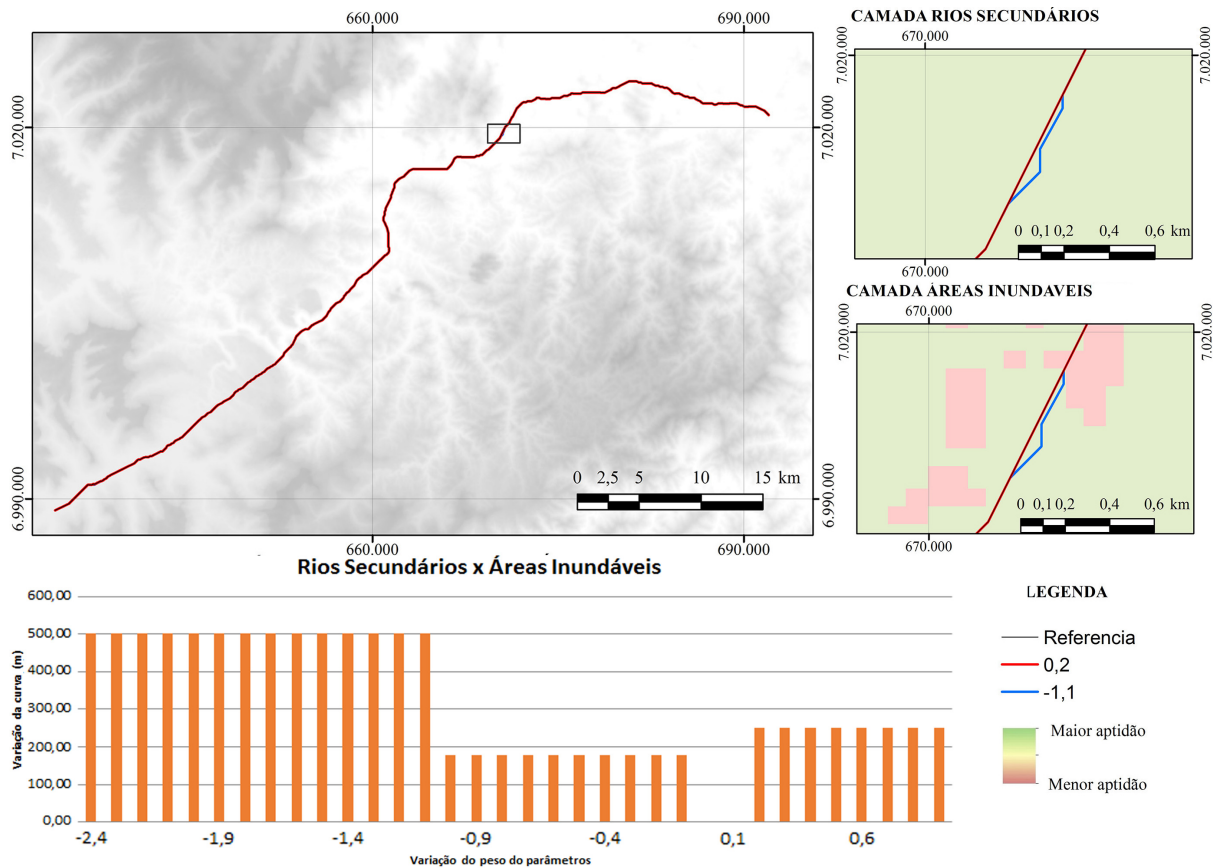
Figura 34: Gráfico de DDF - rios secundários x áreas inundáveis



Fonte: Elaboração própria

Valores de DDF abaixo de 500 metros se mostraram difíceis de serem identificados na análise nos mapas, foram identificadas somente pequenas variações durante todo o percurso da diretriz. Dificultando a identificação do local de maior variação. A Figura 35 ilustra o fato.

Figura 35: Mapa - rios secundários x áreas inundáveis



Fonte: Elaboração própria

### 5.3.2 Nível 2

No nível 2 dos parâmetros técnicos foram variados os parâmetros:

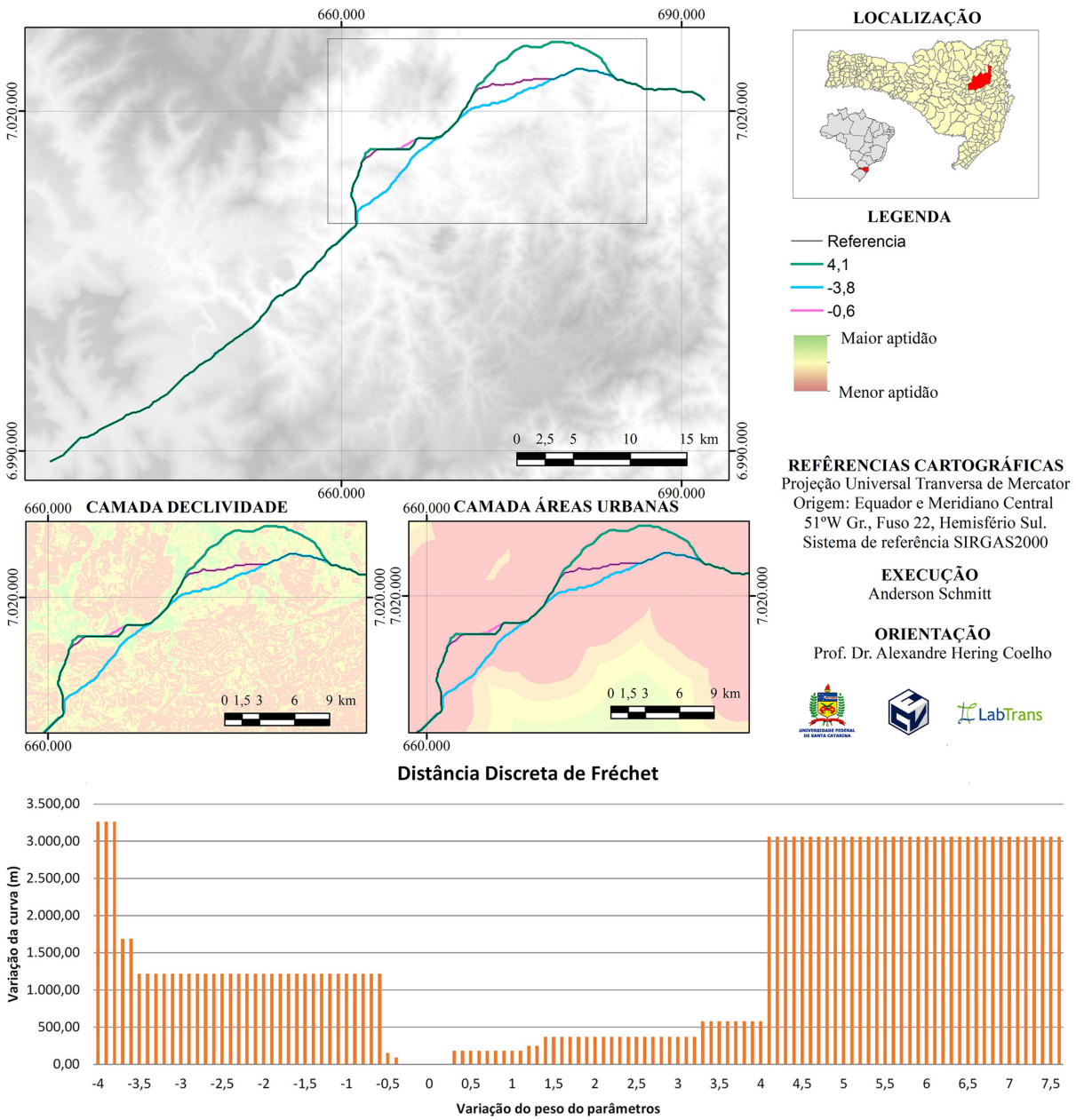
- (a) declividade em relação ao parâmetro áreas urbanas;
- (b) declividade em relação ao parâmetro hidrografia;
- (c) declividade em relação ao parâmetro acessos;
- (d) declividade em relação ao parâmetro solos;
- (e) hidrografia em relação ao parâmetro acessos;
- (f) hidrografia em relação ao parâmetro áreas urbanas;
- (g) hidrografia em relação ao parâmetro solos;
- (h) acessos em relação ao parâmetro áreas urbanas;

- (i) acessos em relação ao parâmetro solos; e
- (j) áreas urbanas em relação ao parâmetro solos.

Como já mencionado, o parâmetro de declividade é o que mais interferiu na sensibilidade da diretriz, em outras palavras, é o parâmetro que gerou maiores valores de DDF e DMH com as menores variações de peso dos parâmetros.

A Figura 36 mostra o resultado da variação do peso do parâmetro declividade em relação ao parâmetro áreas urbanas.

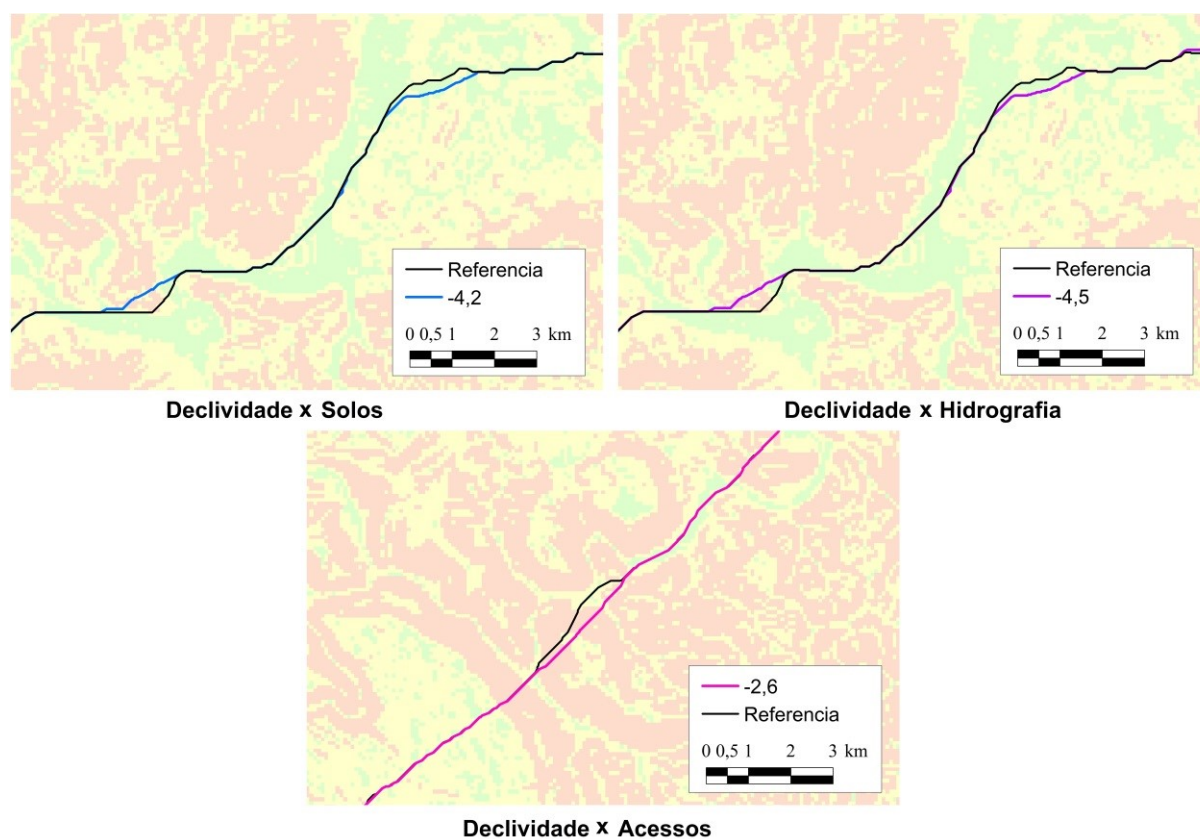
Figura 36: Mapa - declividade x área urbana



Fonte: Elaboração própria

Nota-se que a diminuição do parâmetro declividade em  $-3,8$  fez com que a diretriz percorresse o menor caminho em detrimento de um caminho com área de declividade mais propícia. Como pode ser visto na Figura 37, essa tendência se repetiu também em relação a todos os outros parâmetros, mesmo que em menor escala.

Figura 37: Tendência da diretriz na variação negativa do parâmetro declividade

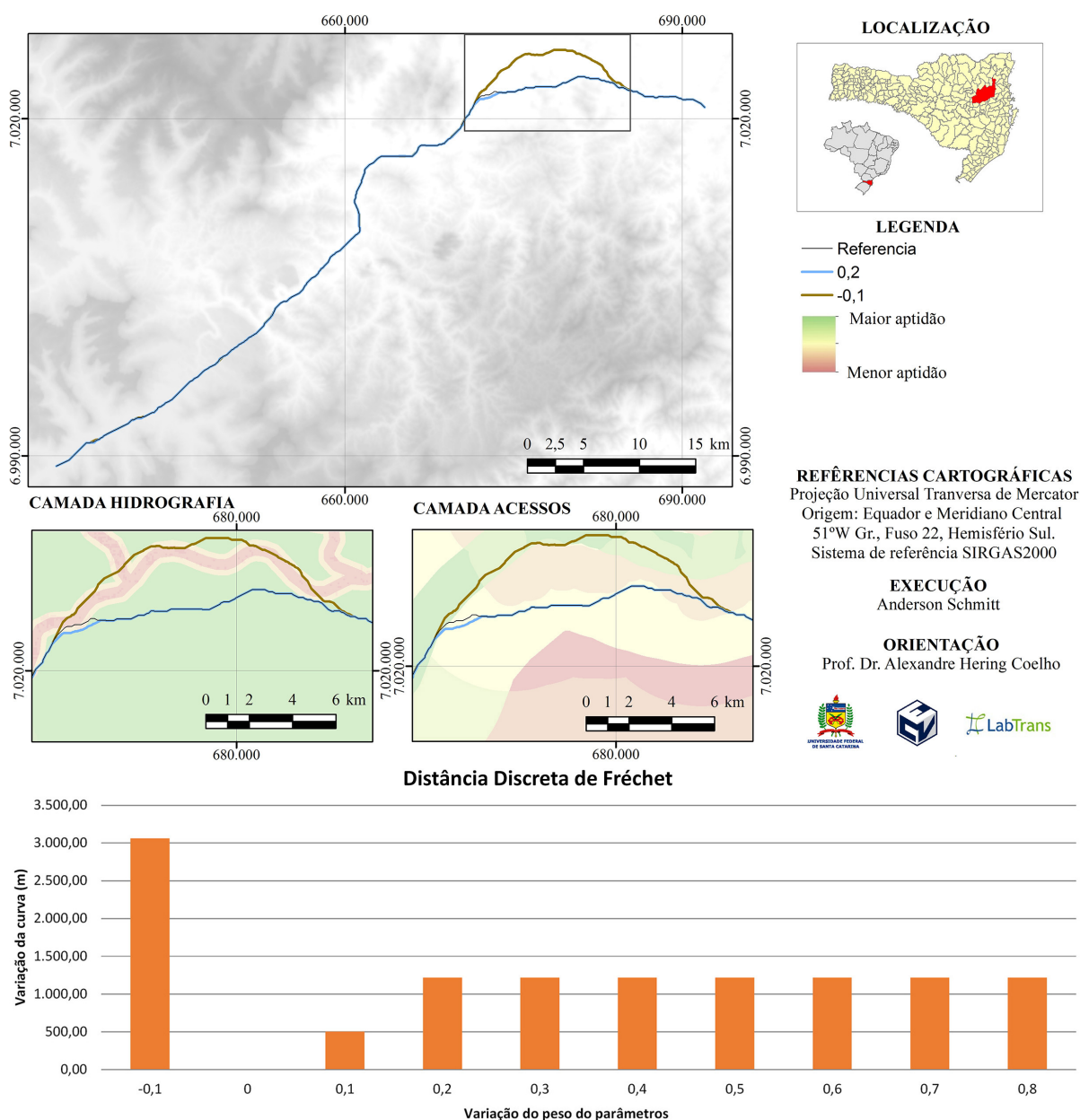


Fonte: Elaboração própria

Aumentar o peso da declividade no AHP indica uma menor tolerância da diretriz do traçado em atravessar pontos de maior altitude, fazendo com que ela siga naturalmente o terreno. Diminuindo o peso da declividade, a diretriz tende a entrar nos pontos de maiores declividades e fazer o menor caminho até a ponto de destino. Ou seja, a diminuição do parâmetro técnico faz com que a função de mínimo custo calcule que o mínimo custo é algo aproximado da menor distância entre os dois pontos.

Relativo à hidrografia, a Figura 38 apresenta o resultado da variação do peso do parâmetro hidrografia em relação ao parâmetro acessos.

Figura 38: Mapa - hidrografia x acessos

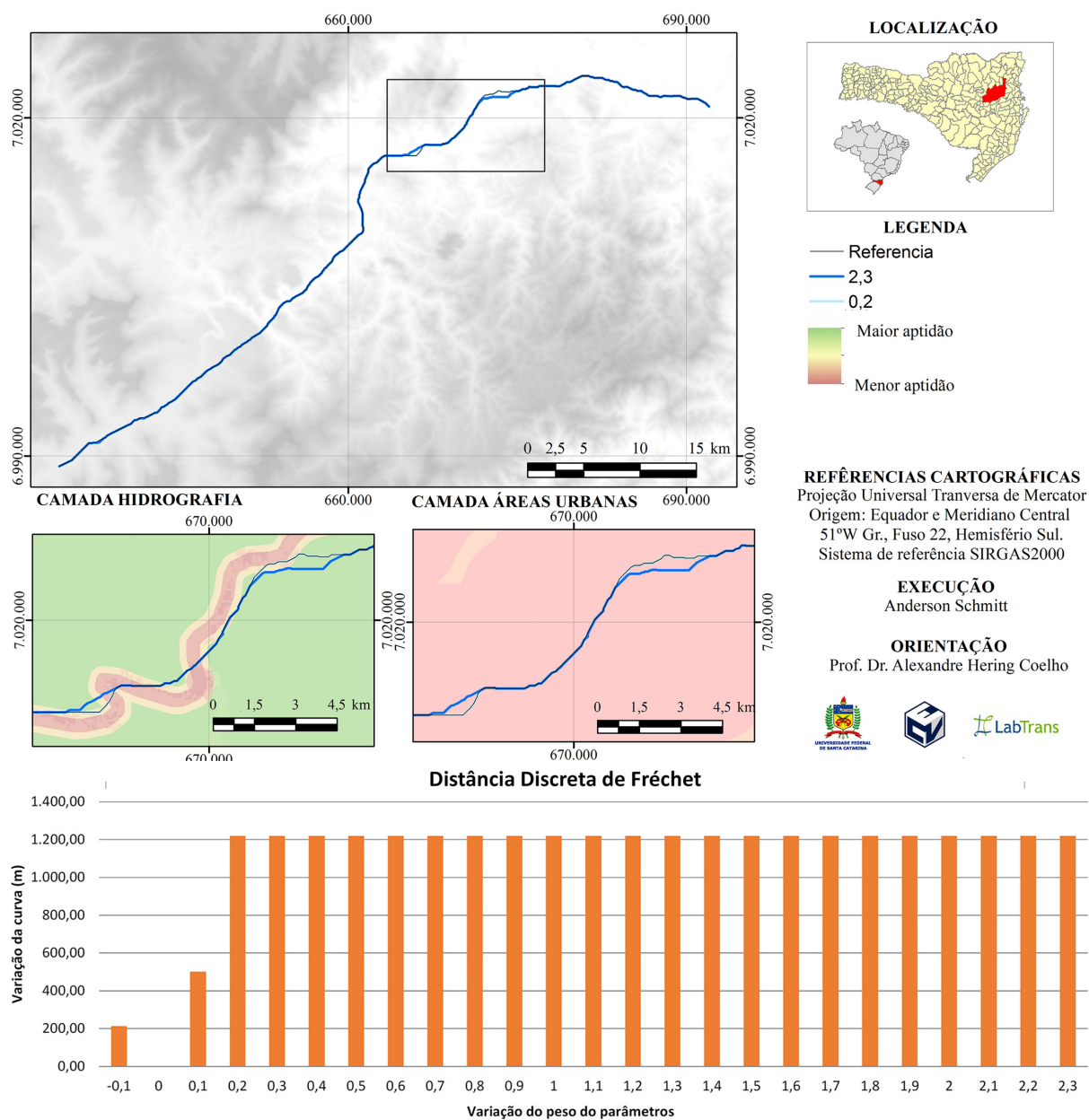


Fonte: Elaboração própria

É possível visualizar na Figura 38 a maior sensibilidade do estudo, um valor de 3060 metros DDF em uma variação de apenas  $-0,1$  do parâmetro. Essa pequena variação do peso fez com que a diretriz tendesse a percorrer caminhos mais propícios da camada acessos.

A sensibilidade na curva provocada pela hidrografia em relação aos outros parâmetros não foi tão alta. Como pode ser visto na Figura 39, o aumento do peso da hidrografia faz com que a diretriz percorra os caminhos de maior aptidão da camada, no entanto sem se afastar muito da diretriz de referência.

Figura 39: Mapa - hidrografia x áreas urbanas

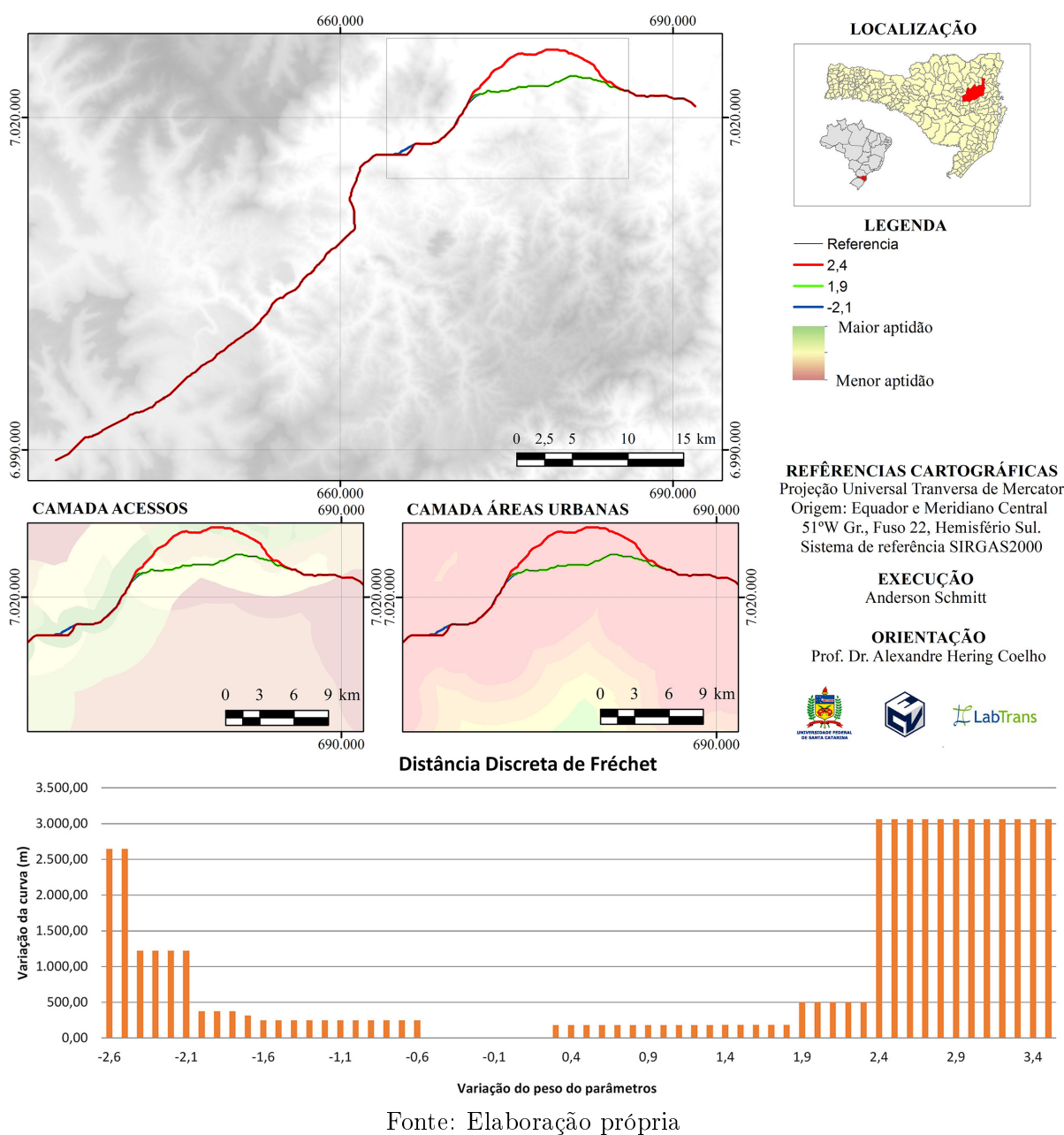


Fonte: Elaboração própria

Referente ao parâmetro acessos, o aumento do parâmetro faz com que a diretriz percorra caminhos mais propícios da camada acessos, como pode ser observado na Figura 40 na variação de +2,4.



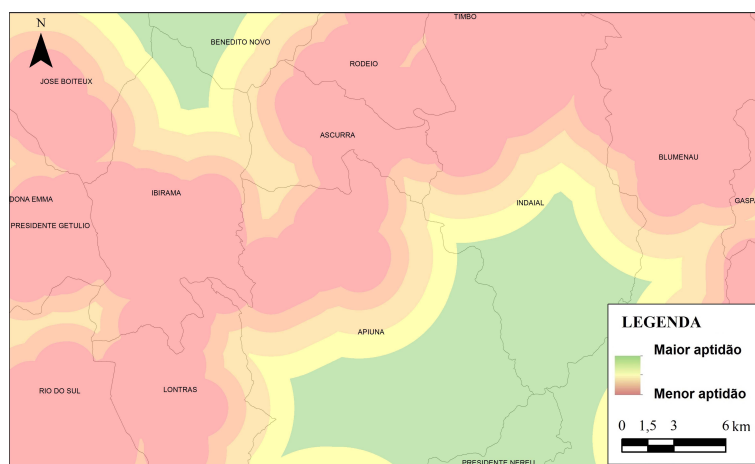
Figura 40: Mapa - acessos x áreas urbanas



Apesar de ser um dos parâmetros secundários de maior ocorrência nos que mais causaram sensibilidade na diretriz, observou-se que, na verdade, o parâmetro áreas urbanas não influencia a sensibilidade da diretriz. O que ocorreu foi que o parâmetro área urbana possui uma contribuição de (9,42%) no resultado final, assim, aumentando o peso relativo dos outros parâmetros, estes aumentam bastante sua contribuição, causando assim mudanças na diretriz.

A Figura 41 mostra que as áreas de maior aptidão da camada área urbana estão muito afastadas da diretriz original, o que justifica a pouca sensibilidade da curva nesse parâmetro.

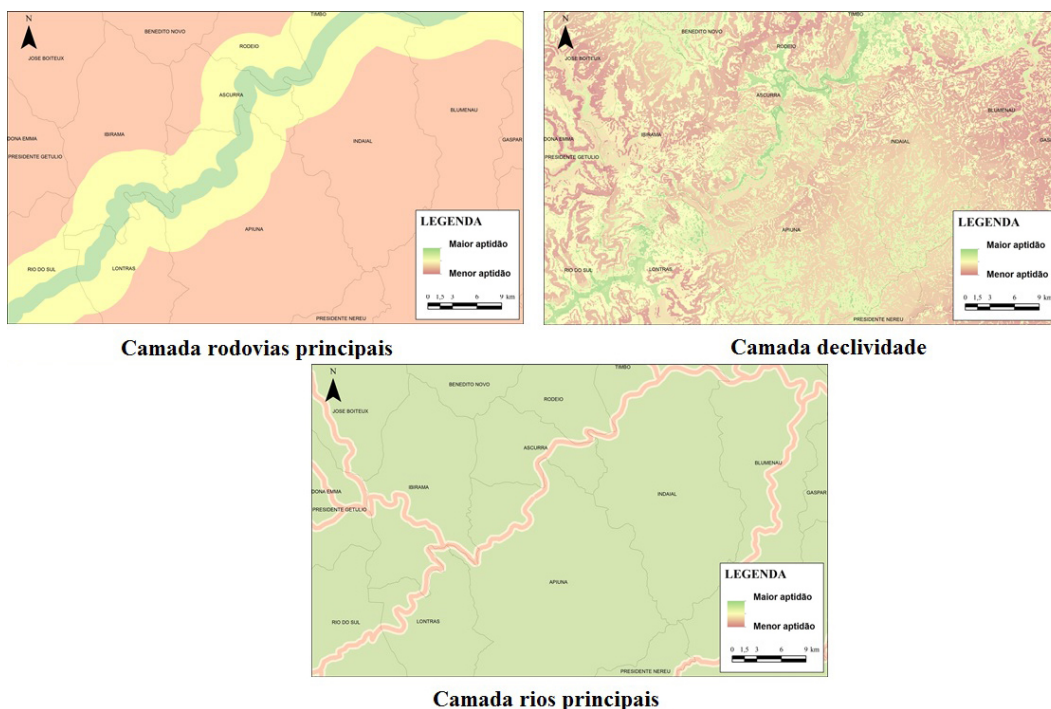
Figura 41: Camada área urbana



Fonte: Elaboração própria

A Figura 42 mostra uma característica da área de estudo, as camadas rodovias principais e declividade se mostram propícias nas mesmas áreas, enquanto que hidrografia se mostra menos apta nessa área. Em conjunto, os parâmetros citados, possuem grande influência na sensibilidade da diretriz.

Figura 42: Camadas rodovias principais, declividade e rios principais



Fonte: Elaboração própria

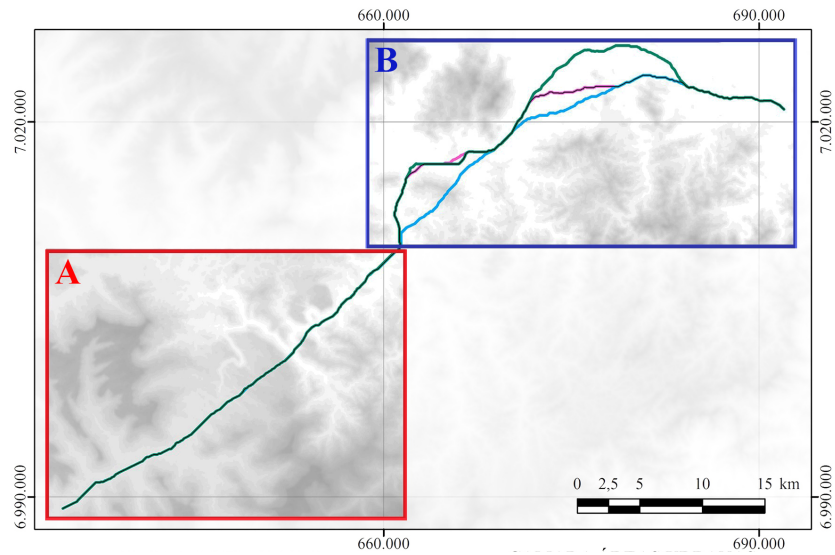
Essa característica não é exclusiva dessa área de estudo, as declividades mais propícias geralmente se encontram nas áreas onde os corpos da água, como rios, correm. Sendo que, essas mesmas áreas são historicamente usadas na implantação de obras lineares como



rodovias e ferrovias.

Identificou-se também que a área A destacada na Figura 43 mostrou pouca ou nenhuma sensibilidade. Enquanto que a área B concentrou todas a maiores variações.

Figura 43: Área de maior variação (A) e área de menor variação (B)



Fonte: Elaboração própria

Nota-se que o traçado na área A já se encontra próximo de um traçado de menor distância entre os pontos de origem e destino, fazendo com que só uma área muito propícia conseguiria deslocar o traçado. O contrário acontece na área B, a mudança dos pesos (principalmente nas camadas de maior contribuição, como é o caso da declividade e rodovias principais) faz com que o traçado se desloque entre as áreas mais propícias das camadas ou se aproxime de um traçado que represente o menor caminho causando, assim, maiores variações no traçado.

5.4 PARÂMETROS RESULTADO

O nível 3 é o nível mais alto do AHP no método utilizado, nesse nível estão vinculados todos os outros parâmetros dos níveis inferiores, ou seja, as alterações de peso nesse nível refletem na contribuição dos outros parâmetros no resultado final.

Tabela 21: Parâmetros resultados e suas contribuições

Parâmetro	Contribuição	Variação da contribuição
Técnico	70,14%	49,43% a 74,80%
Ambiental	8,53%	6,33% a 14,67%
Socioeconômico	21,32%	13,83% a 40,44%

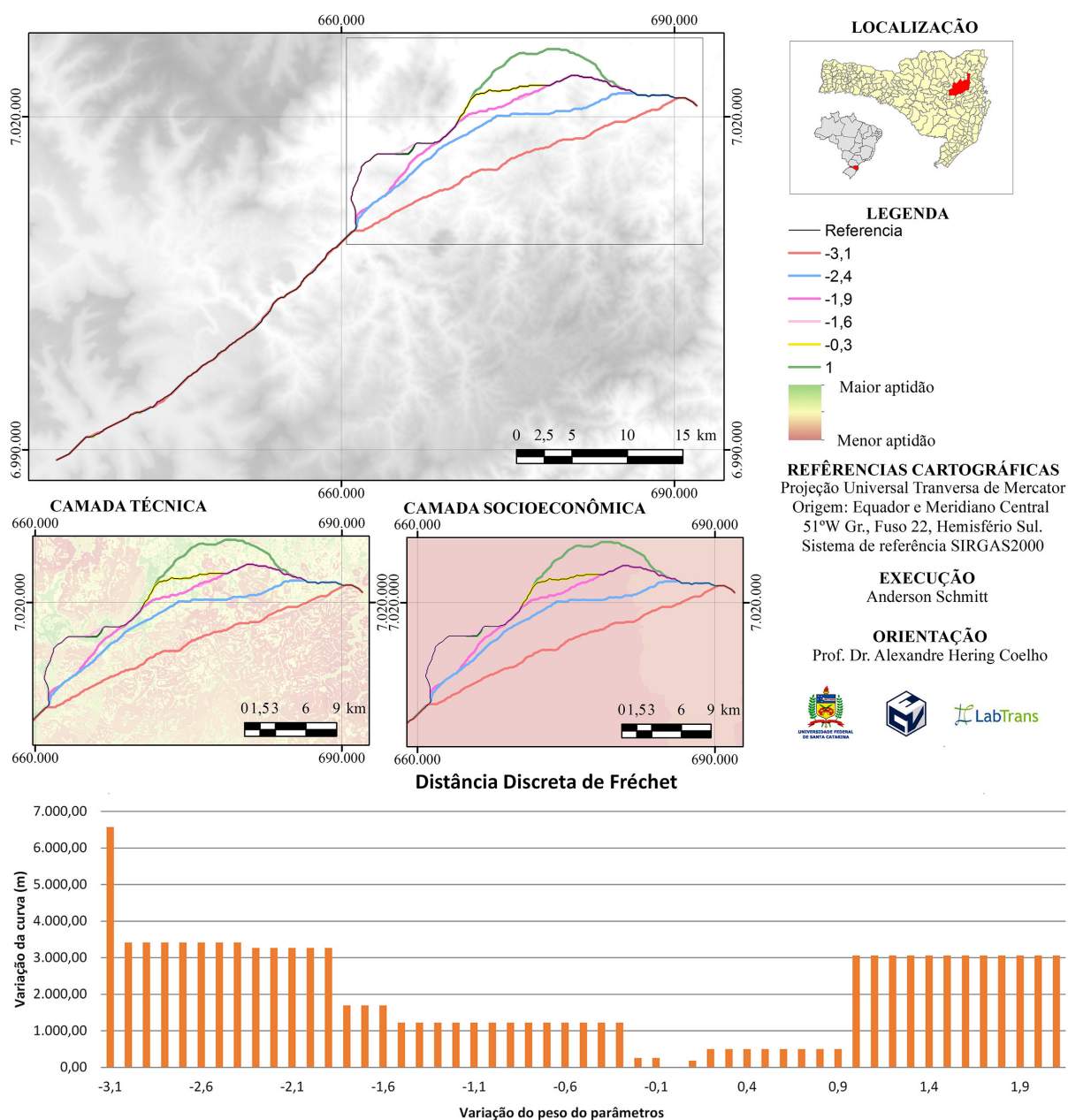
Fonte: Elaboração própria

Foram variados os parâmetros:

- (a) técnico em relação ao parâmetro socioeconômico;
- (b) técnico em relação ao parâmetro ambiental; e
- (c) ambiental em relação ao parâmetro socioeconômico.

A Figura 44 mostra o resultado da variação do peso do parâmetro técnico em relação ao parâmetro socioeconômico.

Figura 44: Mapa - técnico x socioeconômico



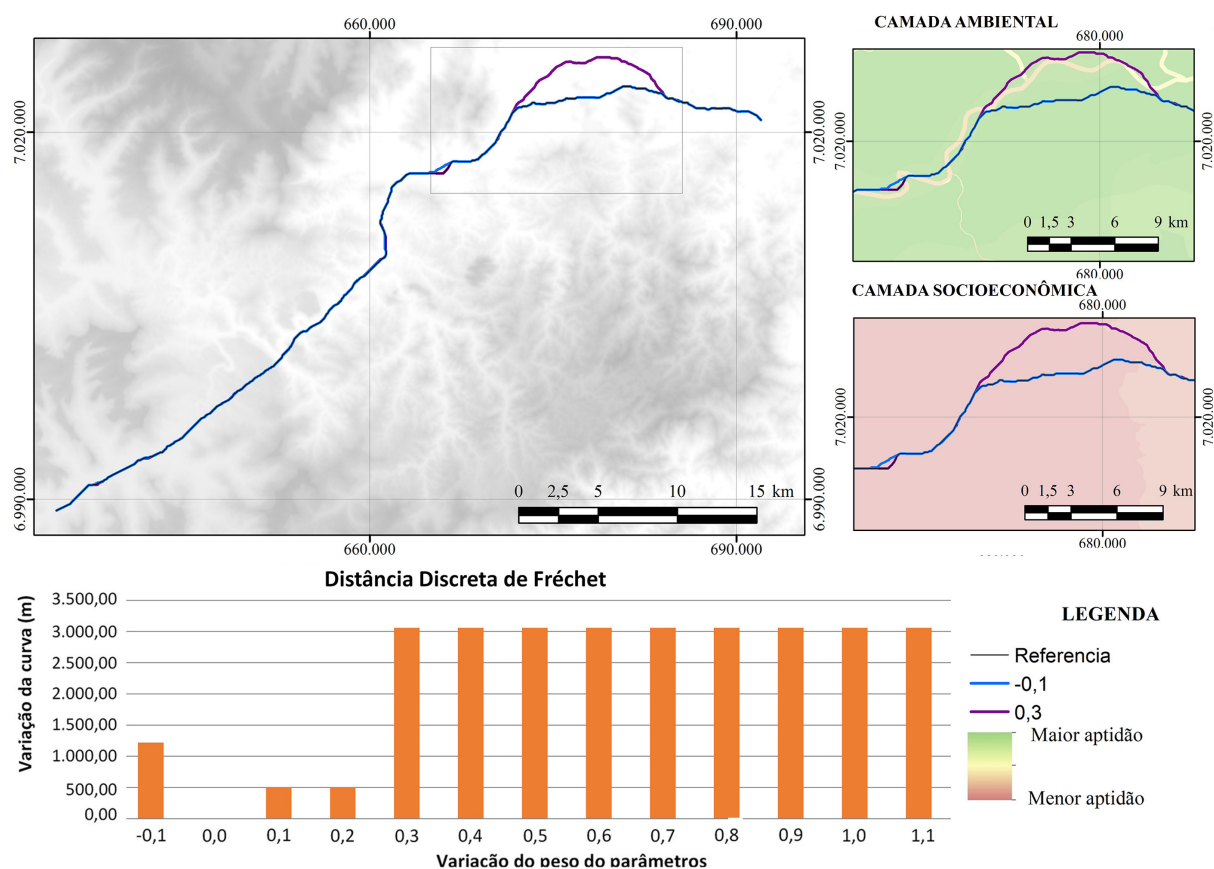
Fonte: Elaboração própria

Os parâmetros técnico e socioeconômico são os que mais contribuem para a definição da diretriz do traçado, juntos somam 91,46% da contribuição. Portanto, a variação do peso desses parâmetros impacta diretamente no resultado da diretriz, como pode ser visto na Figura 44.

A variação negativa do parâmetro técnico faz com que a diretriz se afaste das áreas mais propícias da camada e faz com que ela percorra o menor caminho. O caso mais claro é a variação negativa de  $-3,1$ . Essa variação causou a maior DDF registrada no estudo, 6570 metros. A variação positiva, por outro lado, faz com que a diretriz se desloque às áreas mais propícias da camada técnica, caso da variação  $+1$ .

A Figura 45 mostra o resultado da variação do peso do parâmetro ambiental em relação ao parâmetro socioeconômico. Nota-se que esses parâmetros provocam uma grande sensibilidade nas diretrizes, uma variação de  $-0,1$  no parâmetro ambiental causou 1000 metros de DDF enquanto que a variação de  $+0,3$  causou 3000 metros de DDF.

Figura 45: Mapa - ambiental x socioeconômico

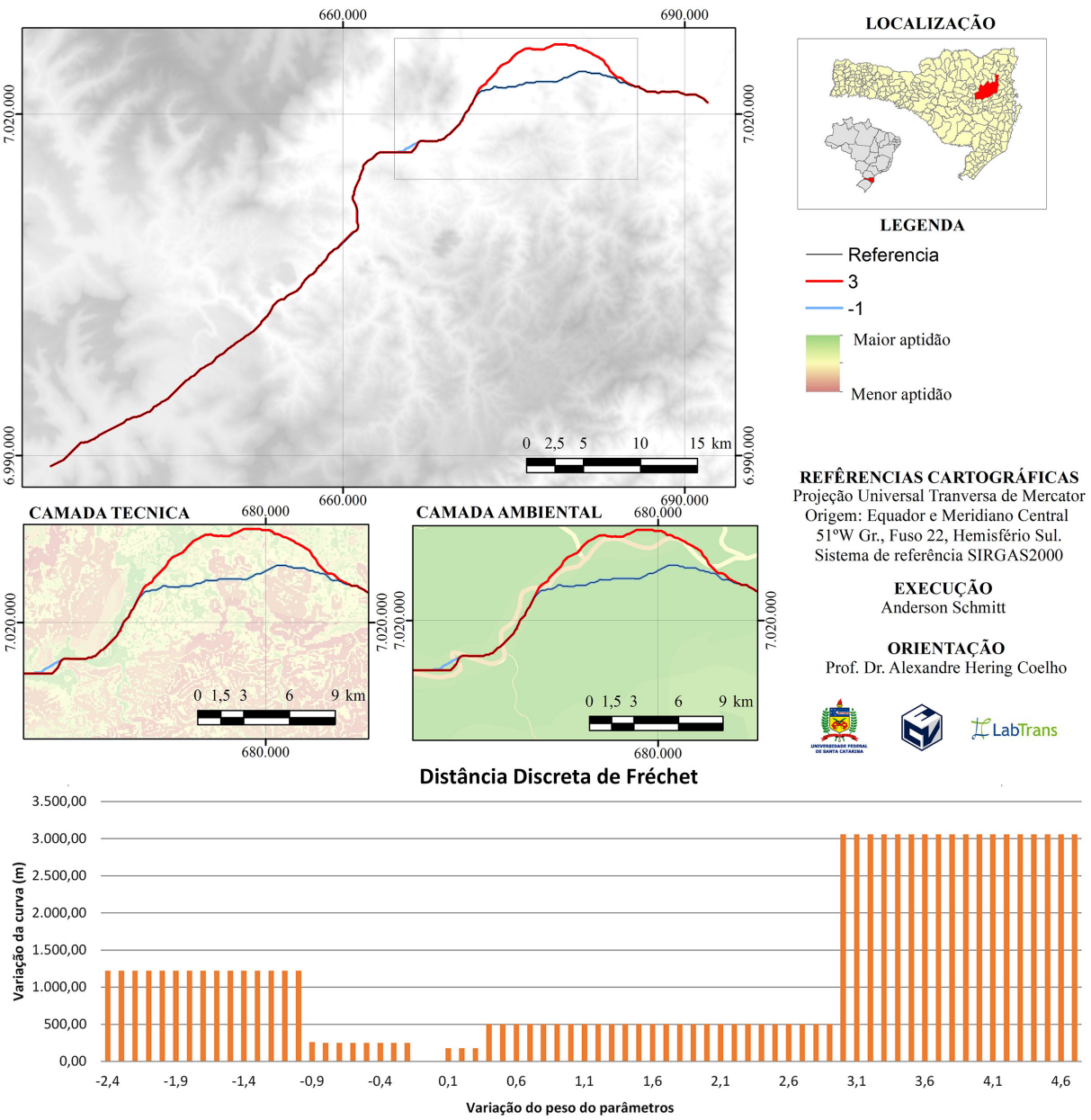


Fonte: Elaboração própria

Na variação do peso do parâmetro técnico em relação ao parâmetro ambiental, a Figura 46 mostra que, a variação positiva da camada técnica desloca a diretriz para

as áreas mais propícias da camada técnica. Já a variação negativa desloca, em menor proporção, a diretriz para áreas mais propícias da camada ambiental.

Figura 46: Mapa - técnico x ambiental



Fonte: Elaboração própria

## 6 CONCLUSÕES

O estudo proposto teve como objetivo analisar a sensibilidade da diretriz de traçado, sendo possível, assim, visualizar o comportamento da mesma e inferir como a mudança dos pesos a altera. Foram feitas no total 6101 variações, que podem ser consideradas como 6101 possibilidades de diretrizes de traçados diferentes.

O estudo auxiliou na identificação de quais parâmetros devem ser melhor estudados. A declividade, por exemplo, foi identificada como o parâmetro que causou os maiores valores de DDFs e DMHs com as menores variações dos pesos. Essa sensibilidade demonstra que o relevo do terreno da área de uma futura obra linear deve ser o parâmetro com melhor qualidade do estudo.

A análise de sensibilidade também apontou parâmetros que não influenciaram na diretriz, ou seja, a variação não causou sensibilidade, são eles:

- (a) todos os parâmetros socioeconômicos;
- (b) parâmetros técnicos: ferrovias e área urbana;
- (c) parâmetros ambientais: distanciamentos legais e assentamentos rurais.

Considerando os resultados obtidos, propõe-se uma simplificação da estrutura para o AHP para a área de estudo. Eliminando os parâmetros que não causaram sensibilidade na diretriz.

Relativo aos pesos do Nível 3 do AHP, isto é, nos três grandes grupos, técnico, ambiental e socioeconômico, o estudo mostrou que a escolha destes deve ser cuidadosamente pensada. Nesses parâmetros estão vinculados vários outros parâmetros. O estudo mostrou que as variações nesses três parâmetros mudam muito o traçado em alguns pontos. Por isso, nota-se claramente que os parâmetros que provocaram maior sensibilidade foram os do grupo técnico, pois estão vinculados ao parâmetro técnico do Nível 3 de maior peso no AHP.

Sobre os métodos de comparação de poligonais, a Distância Discreta de Fréchet (DDF) e a Distância Modificada de Hausdorff (DMH) se mostraram eficazes na função de indicar as diferenças entre as diretrizes geradas. Os gráficos gerados com os valores obtidos de DDF e DMH auxiliaram na identificação rápida da sensibilidade da diretriz.

Concluiu-se que a DDF é mais propícia a identificar variações localizadas da diretriz do traçado, enquanto que a DMH traz valores que avaliam toda a diretriz. Por exemplo, considerando duas variações de pesos, nas duas variações o valor de DDF foi o mesmo, no entanto, se identifica valores diferentes de DMH. Isso mostra que houve variações grandes em outros pontos da curva, enquanto que a maior variação da diretriz continua constante, fazendo com que o DDF não consiga identificar as outras variações. Para esse estudo os valores de DDF foram mais representativos e de melhor visualização, pois as variações ocorreram em sua grande maioria em uma área reduzida.

A análise prévia feita somente com os resultados de DDF e DMH e auxílio dos gráficos se mostraram eficientes na identificação rápida dos parâmetros que causam a maior sensibilidade. No entanto, a análise geográfica, feita por meio dos mapas, se mostrou essencial para visualizar o comportamento da diretriz e compara-la com as camadas de influência.

A metodologia desse estudo pode ser ampliada. Pode-se, por exemplo, ampliar os resultados variando os parâmetros secundários no lugar dos parâmetros primários, aumentando assim a faixa das variações e complementando o estudo. Outra possibilidade para aprofundar o estudo de sensibilidade é variar dois ou mais parâmetros ao mesmo tempo. Ou aumentar previamente o peso do Nível 3 correspondente, antes de variar os parâmetros vinculados a esse nível.

Vale ressaltar que os resultados obtidos nesse estudo podem variar conforme a mudança da área de estudo, ou seja, os resultados apresentados serão sempre particulares para cada área de estudo. As camadas geográficas obviamente serão outras, a estrutura do AHP, o número de parâmetros, bem como os pesos devem ser revistos a cada nova área estudada. Assim a sensibilidade da diretriz da obra linear também pode apontar diferentes resultados.

Dados como os obtidos nesse trabalho auxiliam os tomadores de decisões na melhor escolha dos pesos dos parâmetros. O tomador de decisão pode visualizar a variação da diretriz e ter uma melhor compreensão das mudanças com uma possível alteração nos pesos, fazendo com que ele possa escolher os pesos dos parâmetros de forma direcionada para a área de estudo. A metodologia também proporciona a rápida visualização de várias novas possibilidades de traçados, facilitando e agilizando a tomada de decisão.

## REFERÊNCIAS

- ACEVES-QUESADA, F.; LÓPEZ-BLANCO, J.; POZZO, A. L. M. del. Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y sig en el área del nevado de toluca, centro de méxico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 23, n. 2, p. 113–124, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v23n2/v23n2a1.pdf>>. Acesso em: 28.6.2016.
- ALT, H.; ALBERS, S.; NÄHER, S. *Efficient Algorithms*. [S.l.]: Springer, 2009.
- ANEEL. *Agência Nacional de Energia Elétrica*. 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>.
- ANTAQ. *Agência Nacional de Transportes Aquaviários*. 2016. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/>>.
- ANTT. *Agência Nacional de Transportes Terrestres*. 2016. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/>>. Acesso em: 03.7.2016.
- BETHONICO, F. C. *Calibração de simuladores microscópicos de tráfego através de medidas macroscópicas*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, 2016.
- CÂMARA, G. et al. *Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica*. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/anatomia.pdf>>. Acesso em: 05.4.2016.
- COSTA, P. D. A. V.; COSTA, P. F. M. D.; VASCONCELLOS, J. C. P. D. Sig 3d - um estudo de caso para a construção de ferrovias. In: *II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*. Recife - PE: [s.n.], 2008. Disponível em: <[https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOII\\_CD/Organizado/cart\\_sig/096.pdf](https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOII_CD/Organizado/cart_sig/096.pdf)>. Acesso em: 28.6.2016.
- DNIT. *DIRETRIZES BÁSICAS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS E PROJETOS RODOVIÁRIOS - ESCOPOS BÁSICOS/INSTRUÇÕES DE SERVIÇO*. [S.l.], 2006. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/diretrizes\\_basicas\\_instrucoes\\_servicos.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/diretrizes_basicas_instrucoes_servicos.pdf)>.
- DNIT. *Instrução de Serviço Ferroviário 205: Estudos de Traçado*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/instrucoes-de-servicos-ferroviarios/isf-205-estudos-de-tracado.pdf>>. Acesso em: 28.6.2016.
- DODDE, P. A. M. *IMPACTOS DE EMPREENDIMENTOS LINEARES EM TERRAS INDÍGENAS NA AMAZÔNIA LEGAL: O CASO DA BR-230/PA E DAS TERRAS INDÍGENAS MÃE MARIA, NOVA JACUNDÁ E SORORÓ*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- DUBUISSON, M.-P.; JAIN, A. K. A modified hausdorff distance for object matching. In: *International Conference on Pattern Recognition, Jerusalem, Israel*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 566–568.

- EITER, T.; MANNILA, H. *Computing Discrete Fréchet Distance*. [S.l.], 1994.
- ELETROBRÁS. *Diretrizes para projeto básico de sistemas de transmissão - Linhas e subestações*. 1997.
- GIPPS, P. G.; GU, K. Q.; BARNETT, A. H. and Guy. New technologies for transport route selection. *Transportation Research Part C* 9, 2001.
- GOMES, K. G. A. *Um método multicritério para localização de unidades celulares de intendência da FAB*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio, Rio de Janeiro, jul 2009. Disponível em: <[http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/14984/14984\\_1.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/14984/14984_1.PDF)>. Acesso em: 28.6.2016.
- HEYWOOD, I.; CORNELIUS, S.; CARVER, S. An introduction to geographical information systems third edition. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Pearson Education Limited, 2006. p. 426.
- JUNIOR, L. F. N. *TOMADA DE DECISÃO COM MÚLTIPLOS CRITÉRIOS: Pesquisa-Ação sobre o Método AHP em Pequenas Empresas*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ, 2006. Disponível em: <[http://ppga.com.br/mestrado/2006/nunesjr-luis\\_fernando.pdf](http://ppga.com.br/mestrado/2006/nunesjr-luis_fernando.pdf)>. Acesso em: 05.4.2016.
- LEE, S. H. *Introdução ao projeto geométrico de rodovias*. 3ª edição revista e ampliada. ed. [S.l.]: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- LIMA, J. P.; RAMOS, R. A. R.; JÚNIOR, J. L. F. Priorização de pavimentos com o uso da metodologia de análise multicritério e sig. *ENGEVISTA*, v. 10, n. 2, p. 132–144, dec 2008. Disponível em: <[http://www.uff.br/engevista/2\\_10Engevista6.pdf](http://www.uff.br/engevista/2_10Engevista6.pdf)>. Acesso em: 28.6.2016.
- LOPES, E. E. *Determinação de diretrizes de traçado geométrico de obras lineares utilizando análise multicriterio*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/135515>>. Acesso em: 05.4.2016.
- MALCZEWSKI, J. Gis-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, n. 62, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305900603000801>>. Acesso em: 05.4.2016.
- MILLER, R. S. *GRASS GIS 7.0.6svn Reference Manual - r.drain*. <https://grass.osgeo.org/grass70/manuals/r.drain.html>, 2001.
- MIRANDA, J. I. Fundamentos de sistemas de informações geográficas 2.ed. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. p. 425.
- NETELER, M.; MITASOVA, H. Open source gis, a grass gis approach, third edition. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Springer, 2008. p. 406.
- NOBREGA, R. et al. Bridging decision-making process and environmental needs in corridor planning. *Management of Environmental Quality An International Journal*, v. 20, n. 6, p. 662–637, 2009. Disponível em: <[https://cavs.msstate.edu/publications/docs/2009/10/6305Nobrega\\_et\\_al\\_MEQIJ\\_paper\\_as\\_published.pdf](https://cavs.msstate.edu/publications/docs/2009/10/6305Nobrega_et_al_MEQIJ_paper_as_published.pdf)>. Acesso em: 28.6.2016.



- OLAYA, V. Sistemas de informacion geográfica. In: \_\_\_\_\_. OSGeo, 2011. p. 877.  
Disponível em: <[http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro\\_SIG](http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG)>.
- OLSSON, M. *Usability of computer optimizing program for road alignment in the planning process*. Dissertação (Mestrado) — Department of Civil and Environmental Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2013.
- PETROBRAS. *N-2624 - Implantação de faixas de dutos terrestres*. 2003.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, v. 1, n. 1, 2008. Disponível em: <[http://www.colorado.edu/geography/leyk/geog\\_5113/readings/saaty\\_2008.pdf](http://www.colorado.edu/geography/leyk/geog_5113/readings/saaty_2008.pdf)>. Acesso em: 05.4.2016.
- SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process Second Edition*. [S.l.]: Springer, 2012.
- SALGADO, J. D.; BLANCO, J. L. Evaluación del potencial para acuicultura costera de camarón en el entorno de la laguna de mar muerto, mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio con un sig. *Investigaciones geográficas*, n. 41, p. 62–80, 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n41/n41a5.pdf>>. Acesso em: 05.4.2016.
- SOARES, A. C. C. P. P. *Métodos Geofísicos em Obras Lineares*. Dissertação (Mestrado) — Programa de PósGraduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, 2009.
- TRIMBLE. *Trimble Alignment Planning Solutions*. 2016. Disponível em: <[http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-601026/Trimble\\_planning\\_solution-bro-9-1-11\\_FINAL-low.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-601026/Trimble_planning_solution-bro-9-1-11_FINAL-low.pdf)>.
- VALEC. *EF-280/499/498 – CORREDOR FERROVIÁRIO DE SANTA CATARINA*. 2016. Disponível em: <[http://www.valec.gov.br/acoes\\_programas/CFSCItajaiHervalSaoMiguelDionsio.php](http://www.valec.gov.br/acoes_programas/CFSCItajaiHervalSaoMiguelDionsio.php)>. Acesso em: 31.10.2016.
- VALENTE, R. de O. A.; VETTORAZZI, C. A. Comparação entre métodos de análise de sensibilidade, empregados na tomada de decisão com a avaliação multicriterial. *Sci. For.*, v. 37, n. 82, p. 197–211, jun 2009. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr82/cap09.pdf>>. Acesso em: 28.6.2016.
- WOLFF, C. S. *O método AHP - revisão conceitual e proposta de simplificação*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <[http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtase=0521430\\_08\\_Indice.html](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtase=0521430_08_Indice.html)>. Acesso em: 05.4.2016.
- ZAMBON, K. L. et al. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoeletricas utilizando sig. *Pesquisa Operacional*, v. 25, n. 2, p. 183–199, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pope/v25n2/25705.pdf>>. Acesso em: 05.4.2016.
- ZHAO, C.; SHI, W.; DENG, Y. A new hausdorff distance for image matching. *Pattern Recognition Letters*, n. 26, p. 581–586, 2005.

## A MAPAS

Figura 47: Mapa - rodovias principais x rodovias secundárias

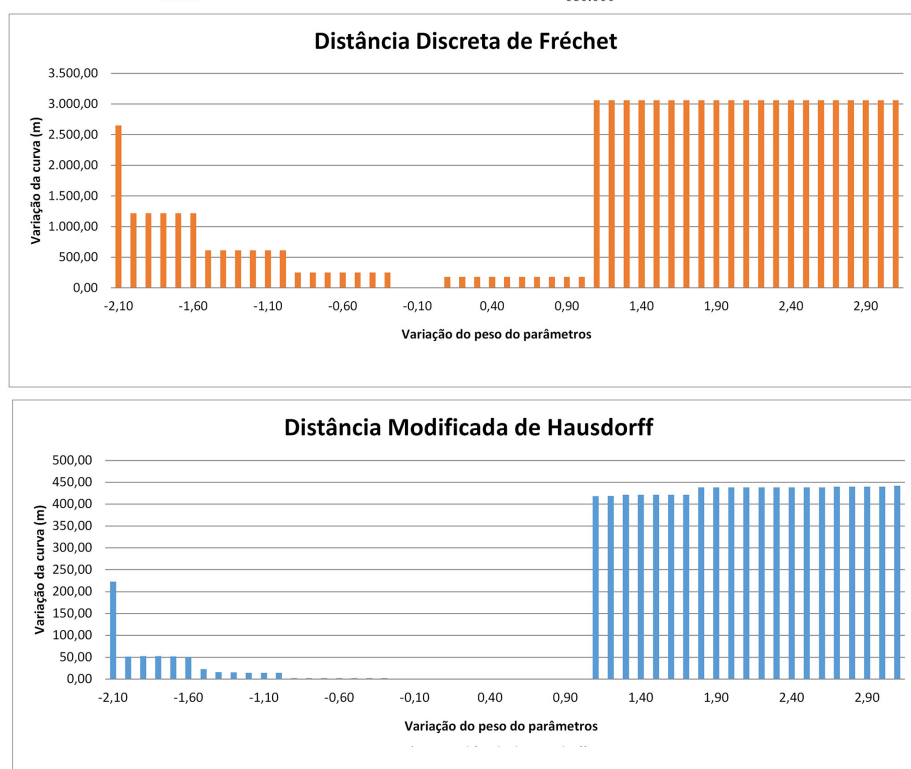
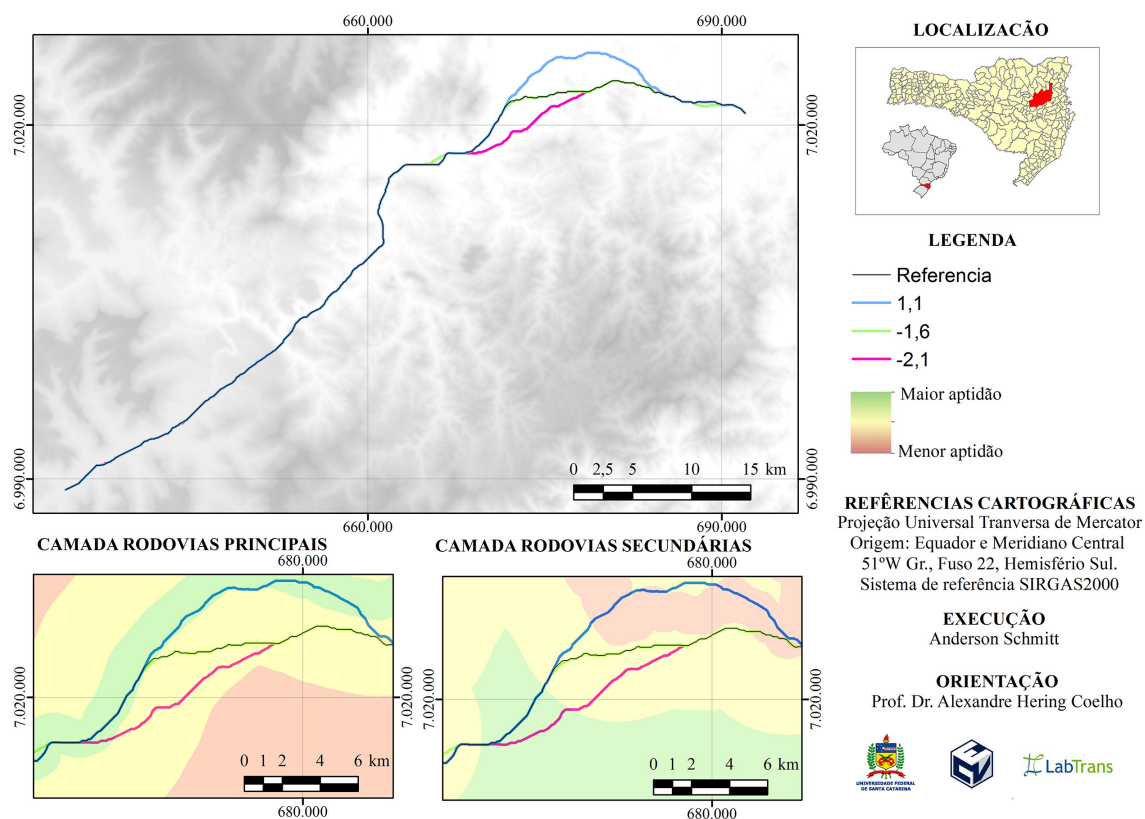


Figura 48: Mapa - rodovias principais x ferrovias

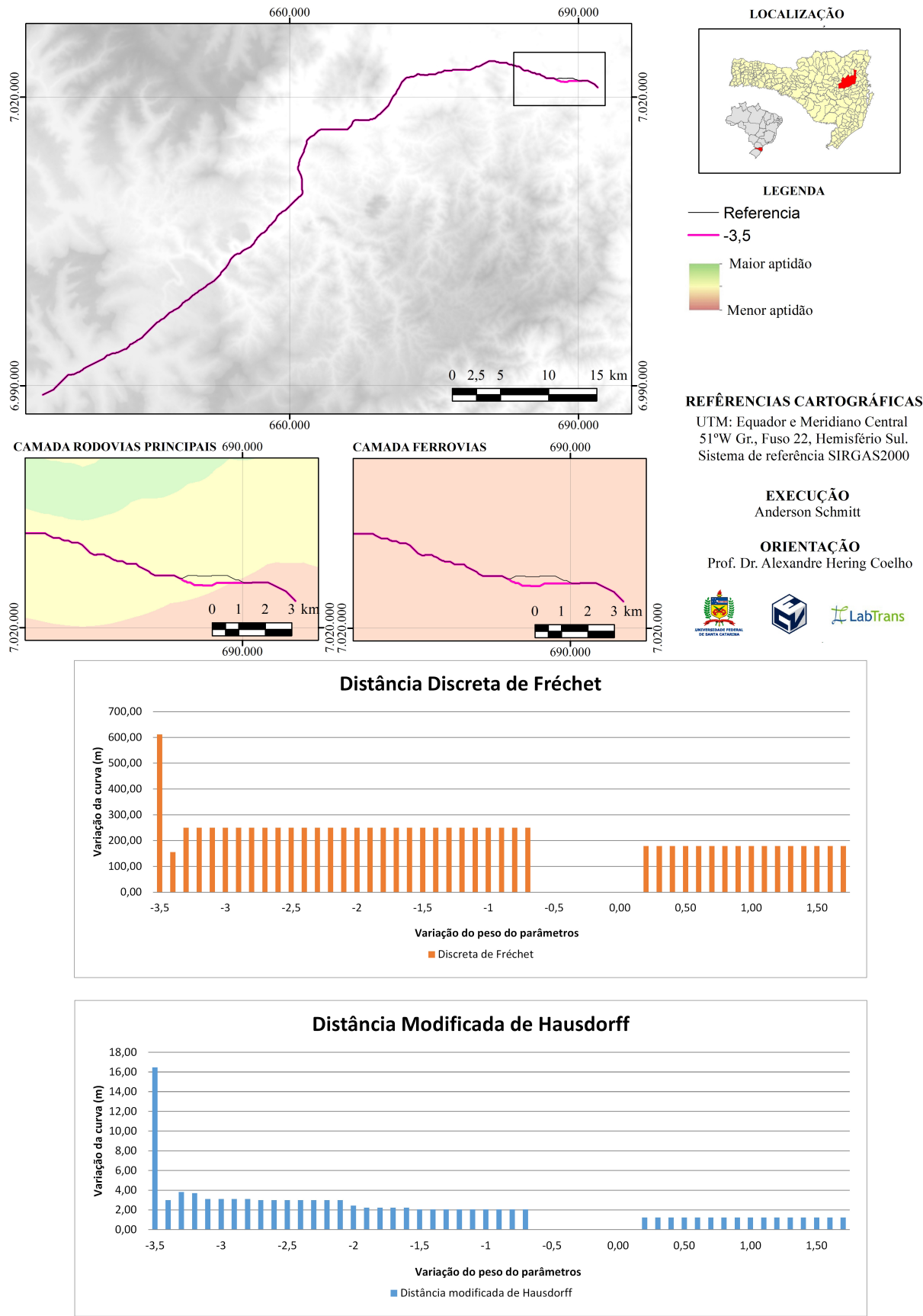


Figura 49: Mapa - rodovias secundárias x ferrovias

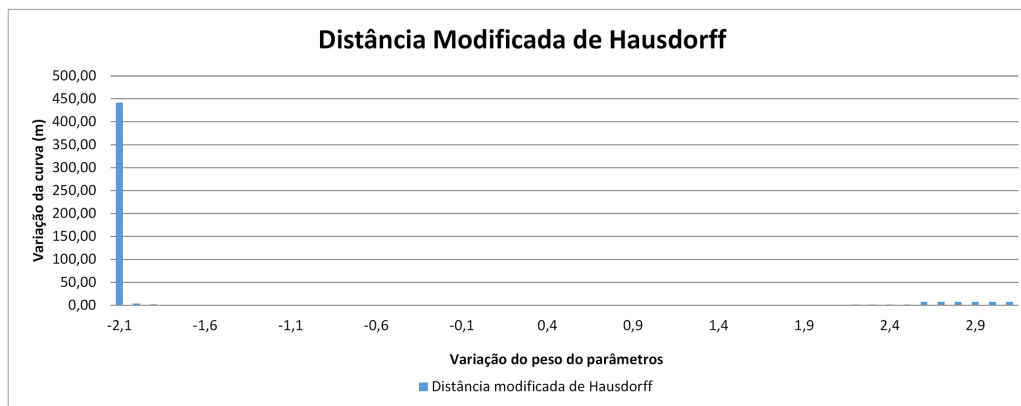
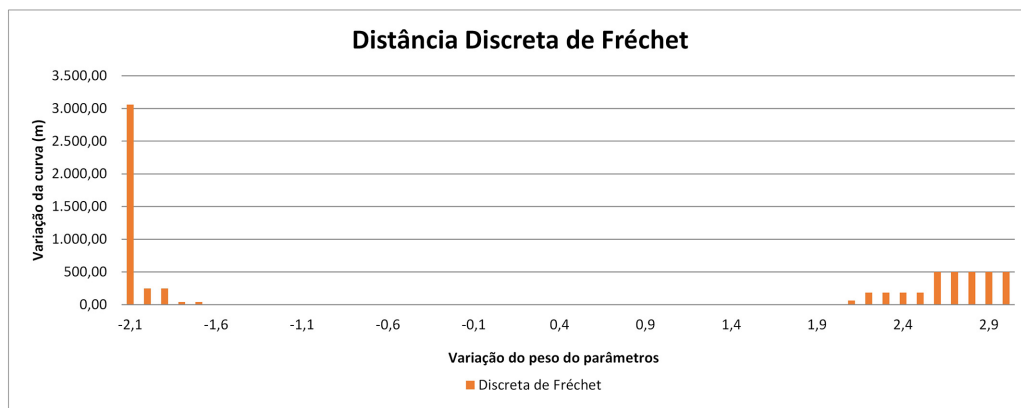
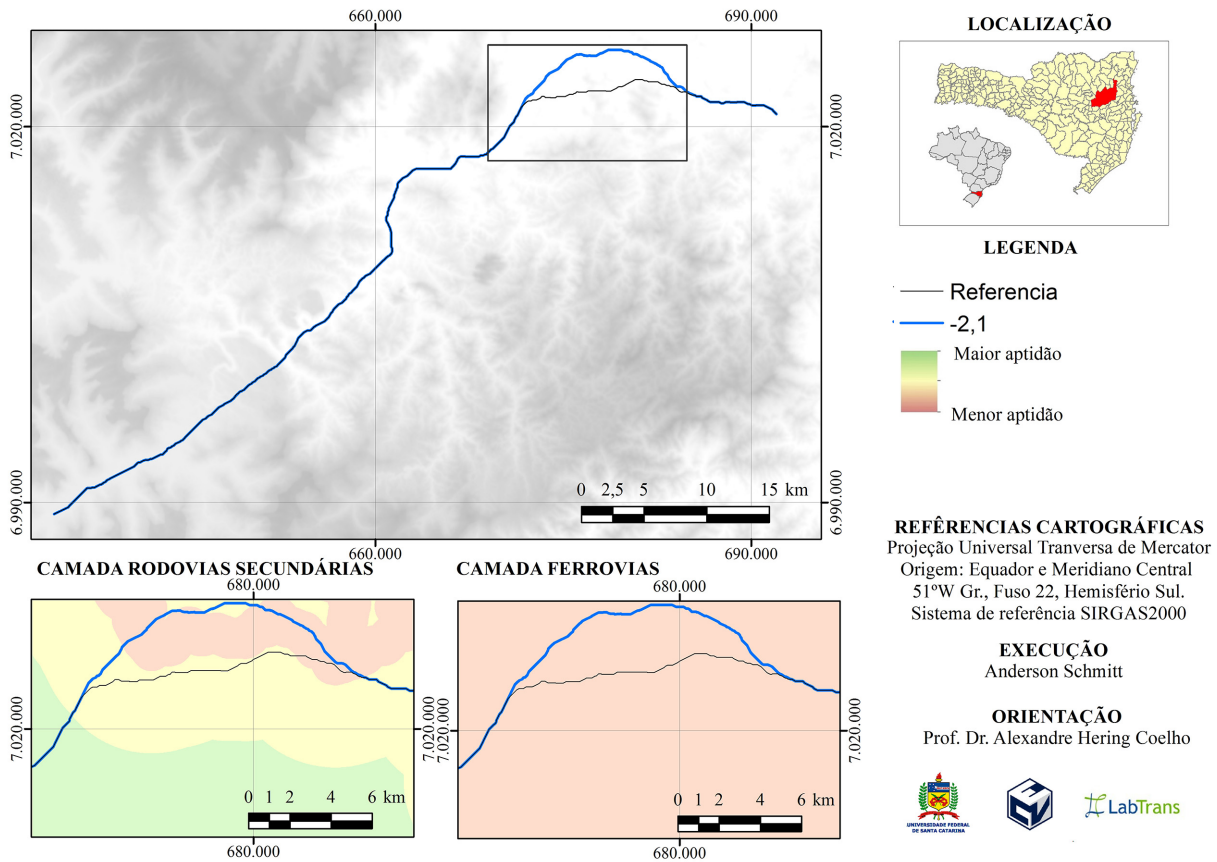


Figura 50: Mapa - rios principais x rios secundários

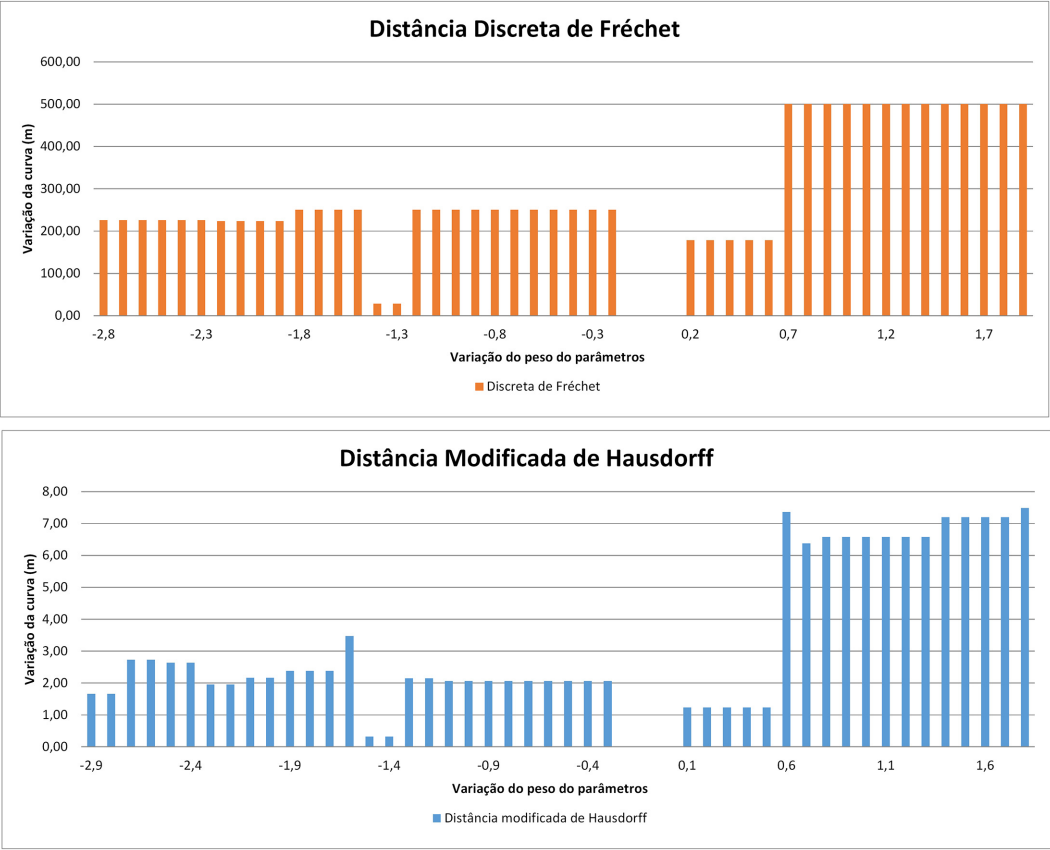
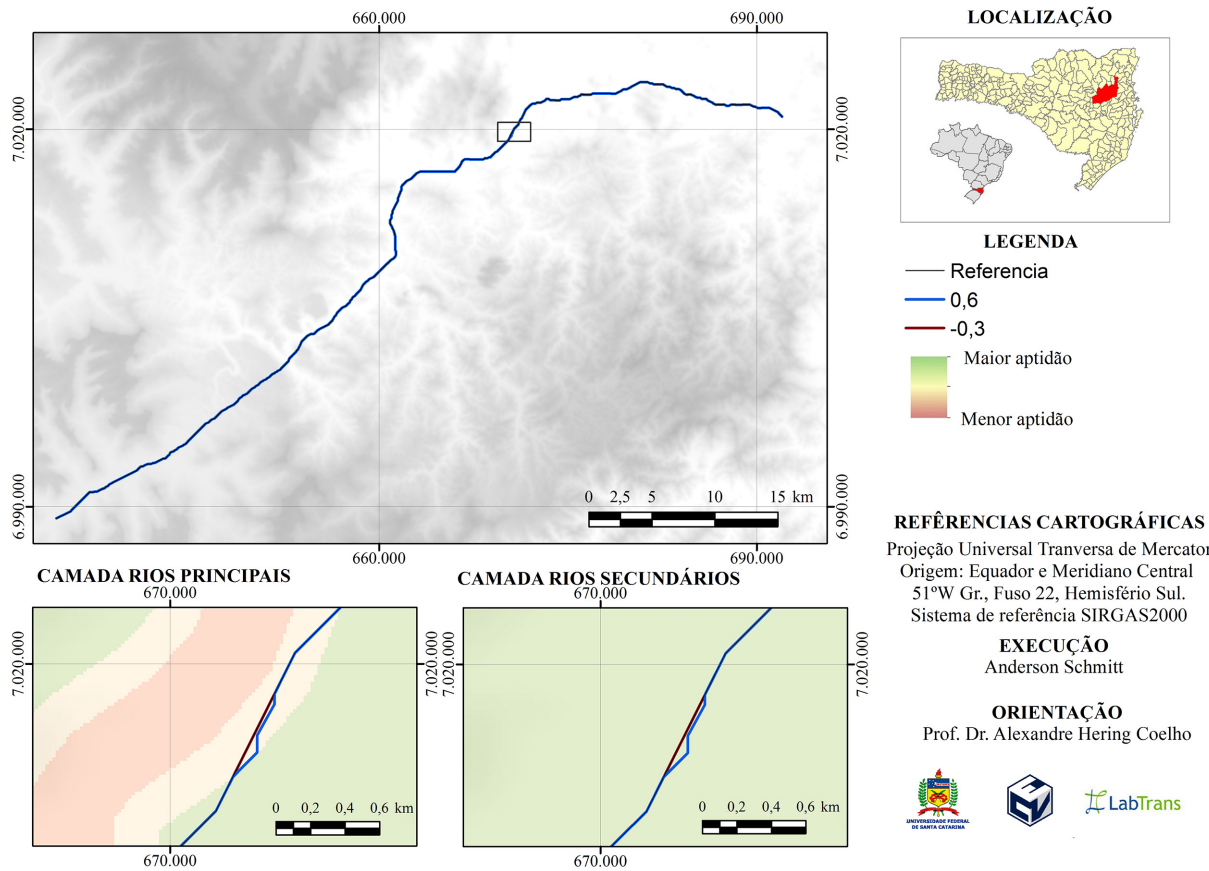


Figura 51: Mapa - rios principais x áreas inundáveis

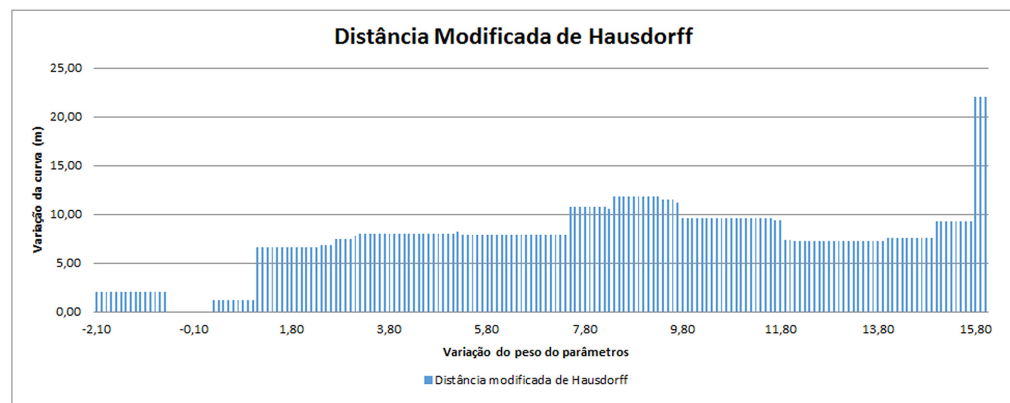
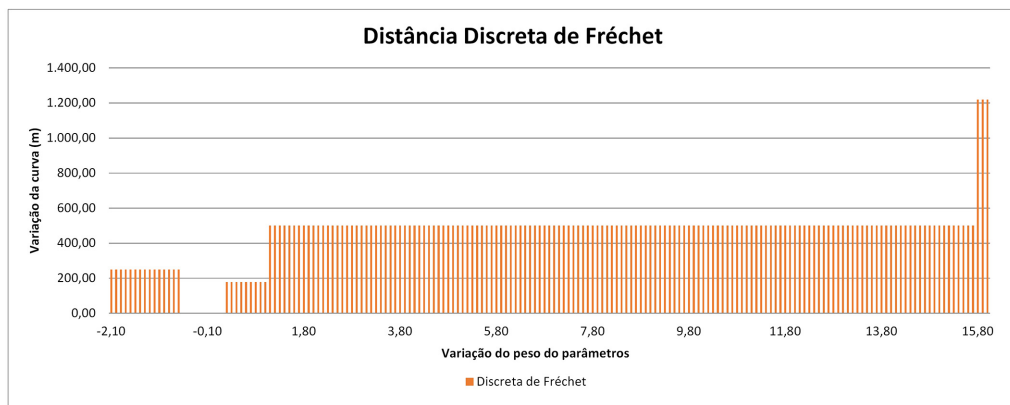
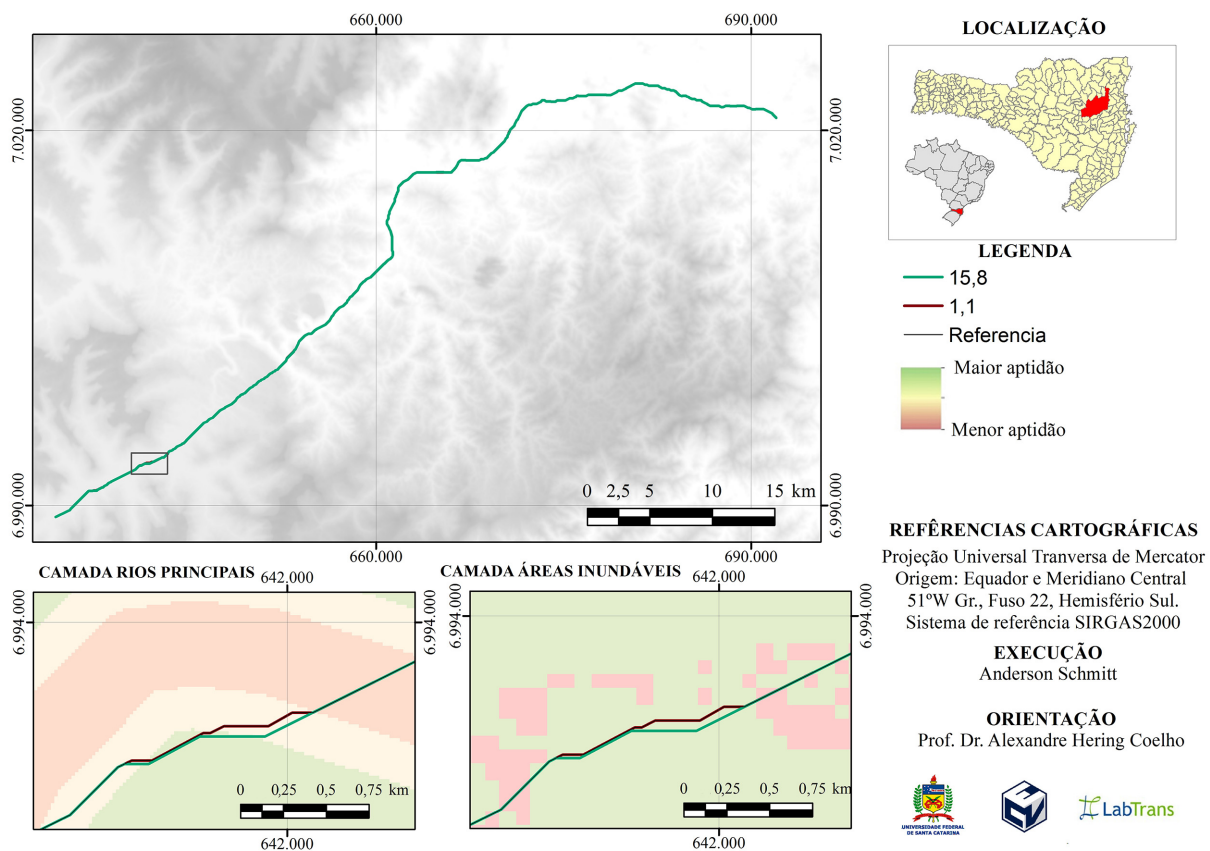




Figura 52: Mapa - rios secundários x áreas inundáveis

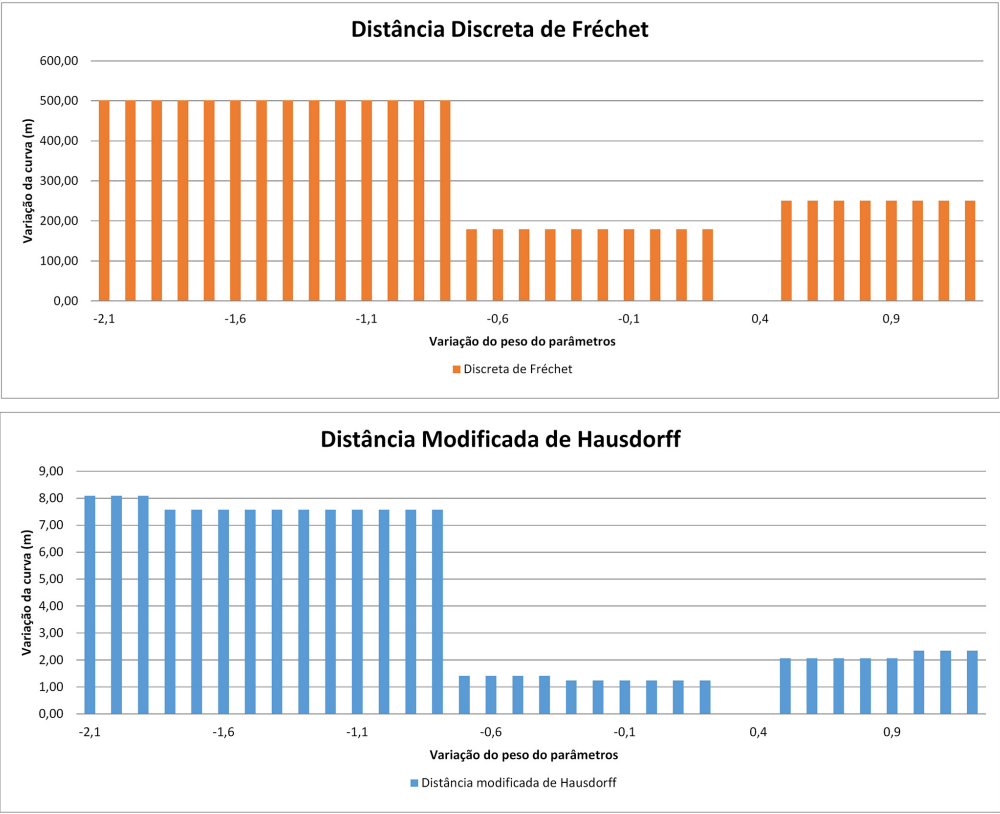
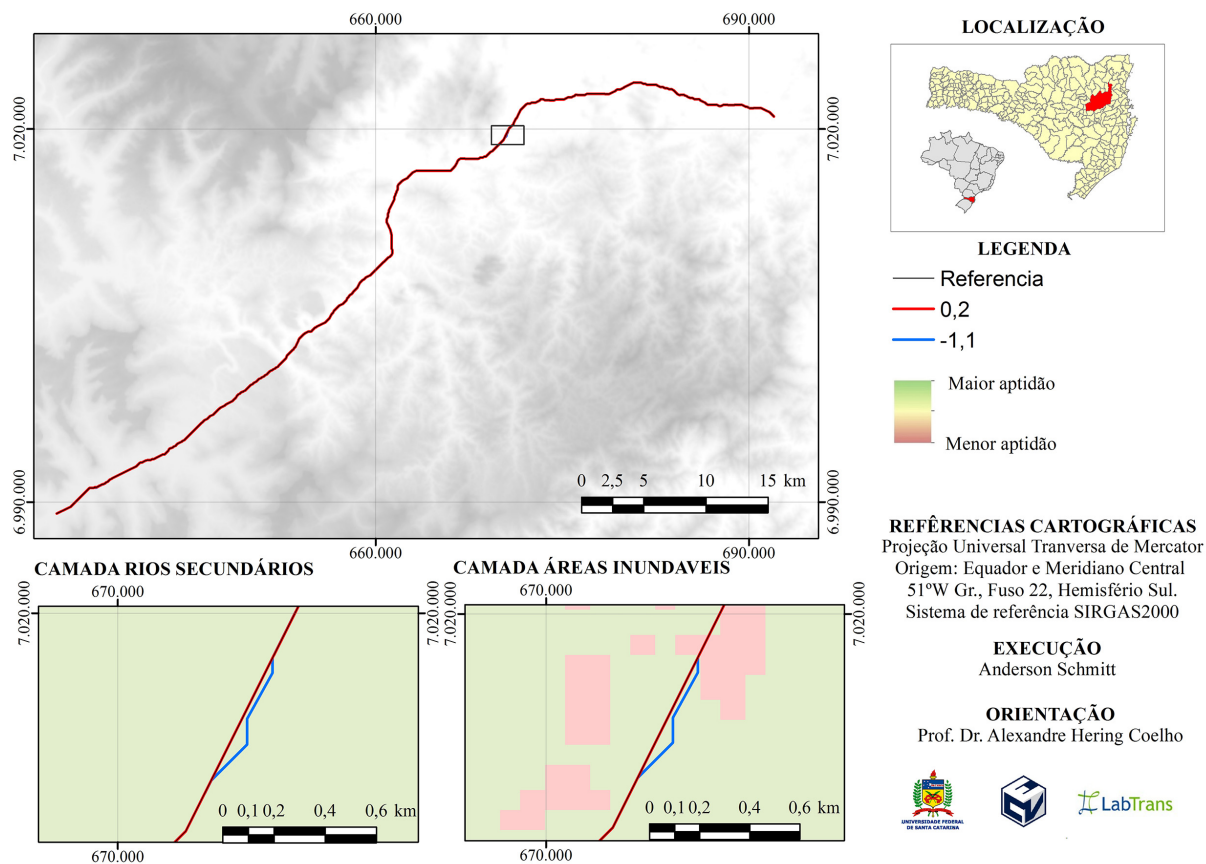
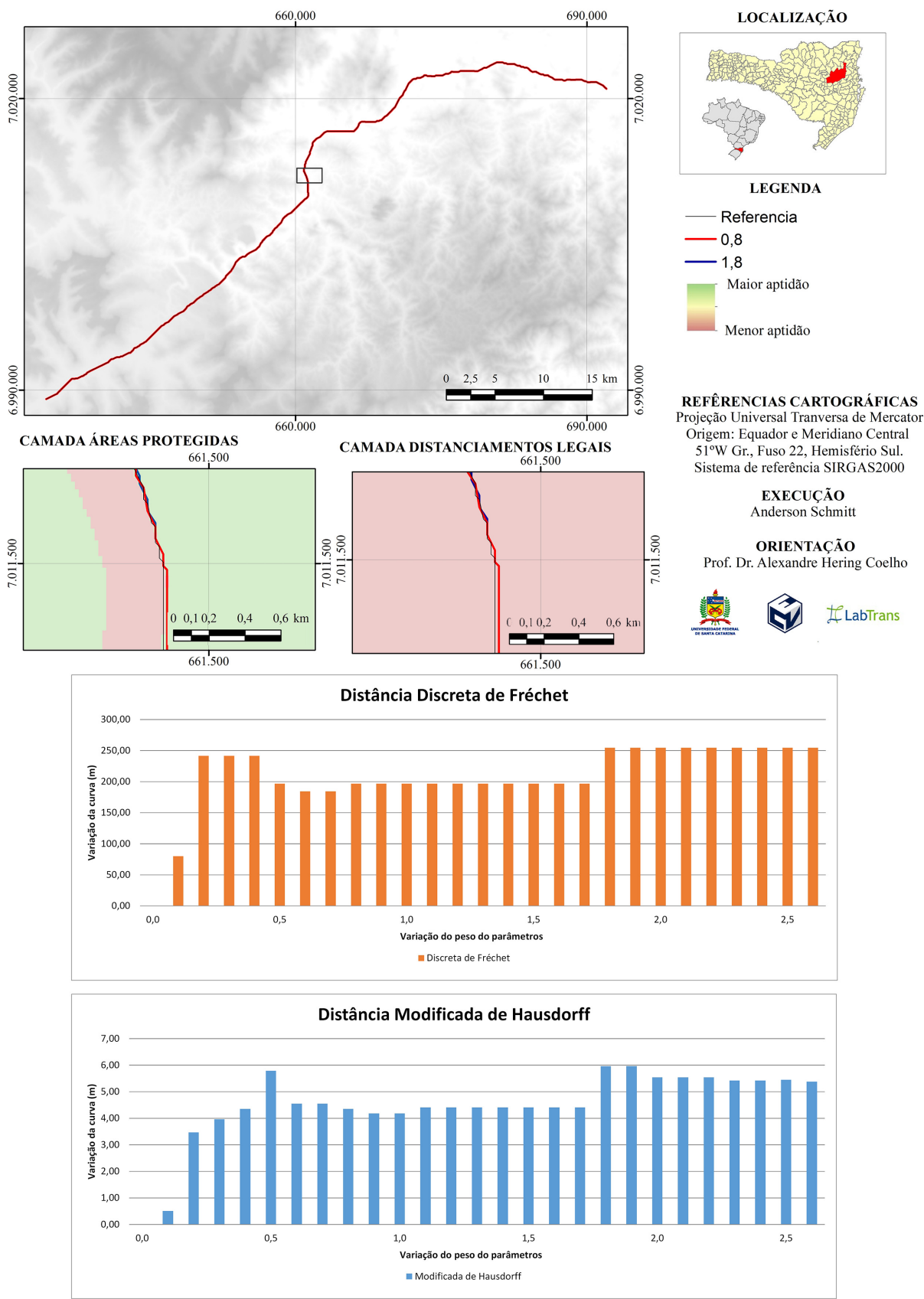


Figura 53: Mapa - áreas protegidas x distanciamentos legais



**Distância Discreta de Fréchet**

Varição da curva (m)

Varição do peso do parâmetros

Discreta de Fréchet

**Distância Modificada de Hausdorff**

Varição da curva (m)

Varição do peso do parâmetros

Modificada de Hausdorff



Figura 54: Mapa - áreas protegidas x áreas prioritárias para conservação

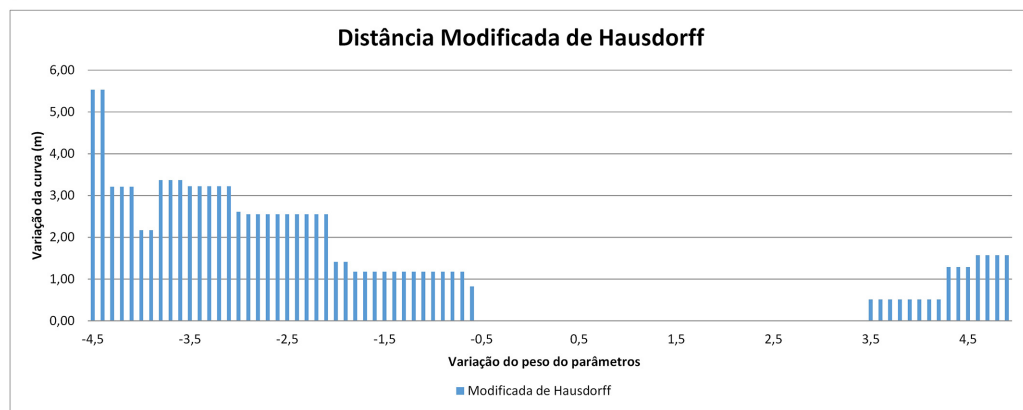
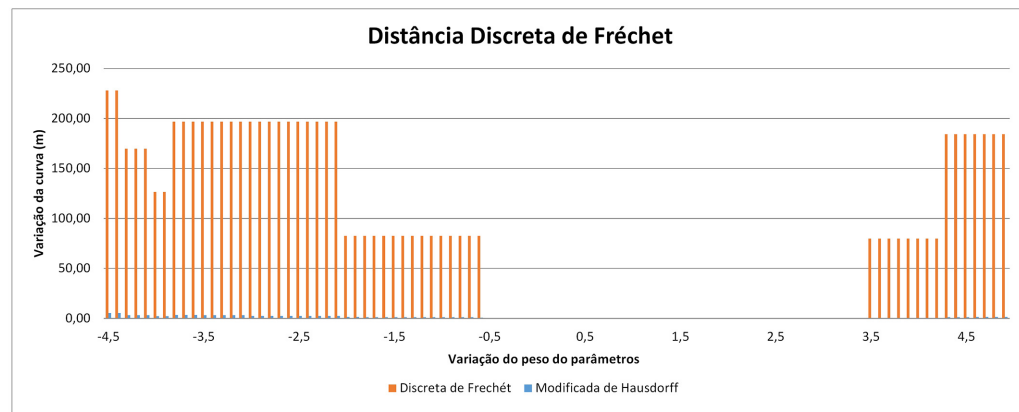
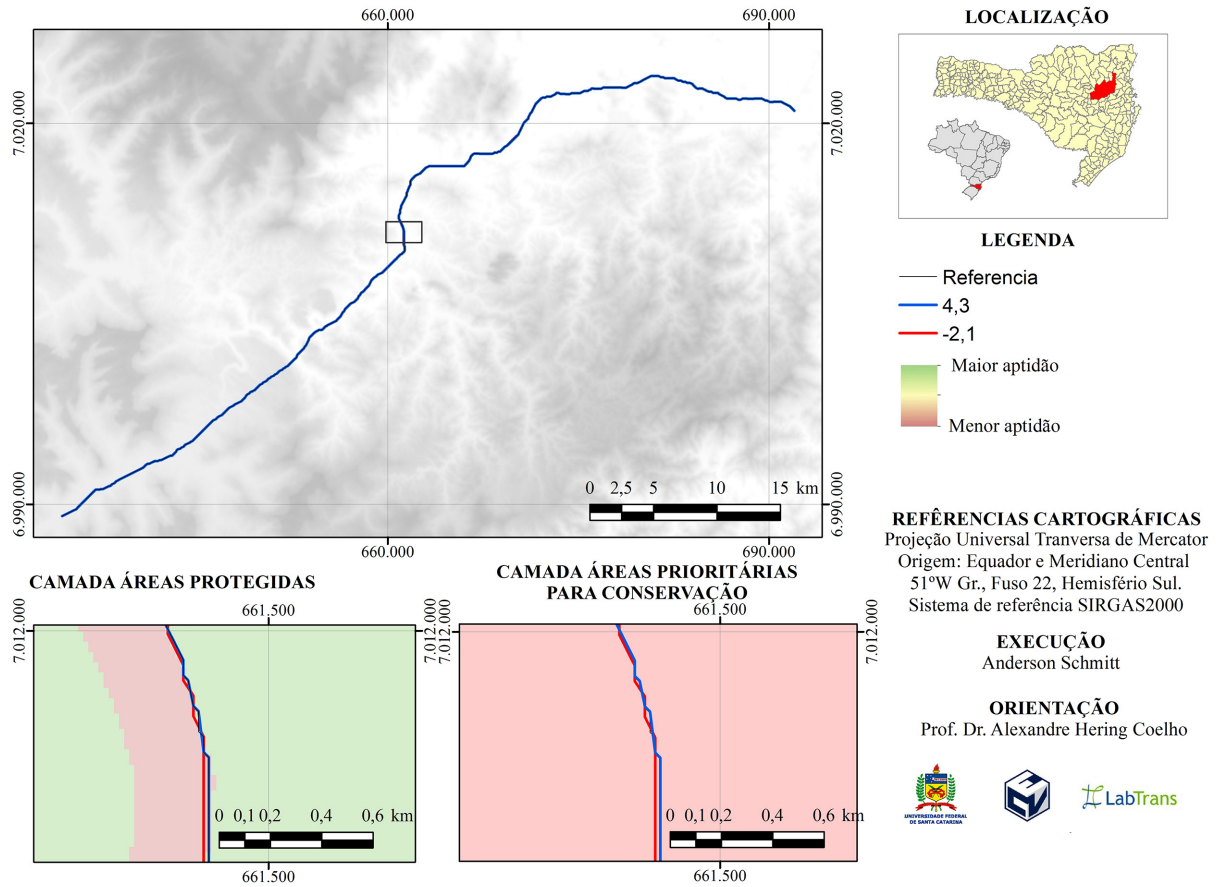


Figura 55: Mapa - áreas protegidas x assentamento rural

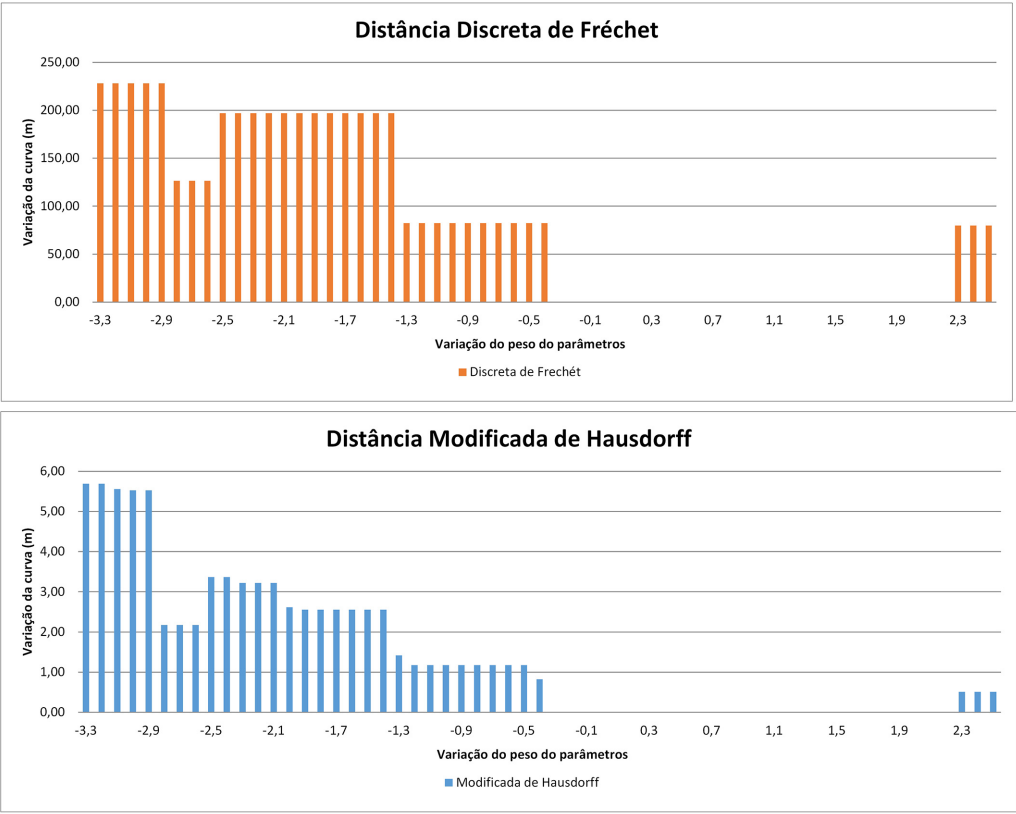
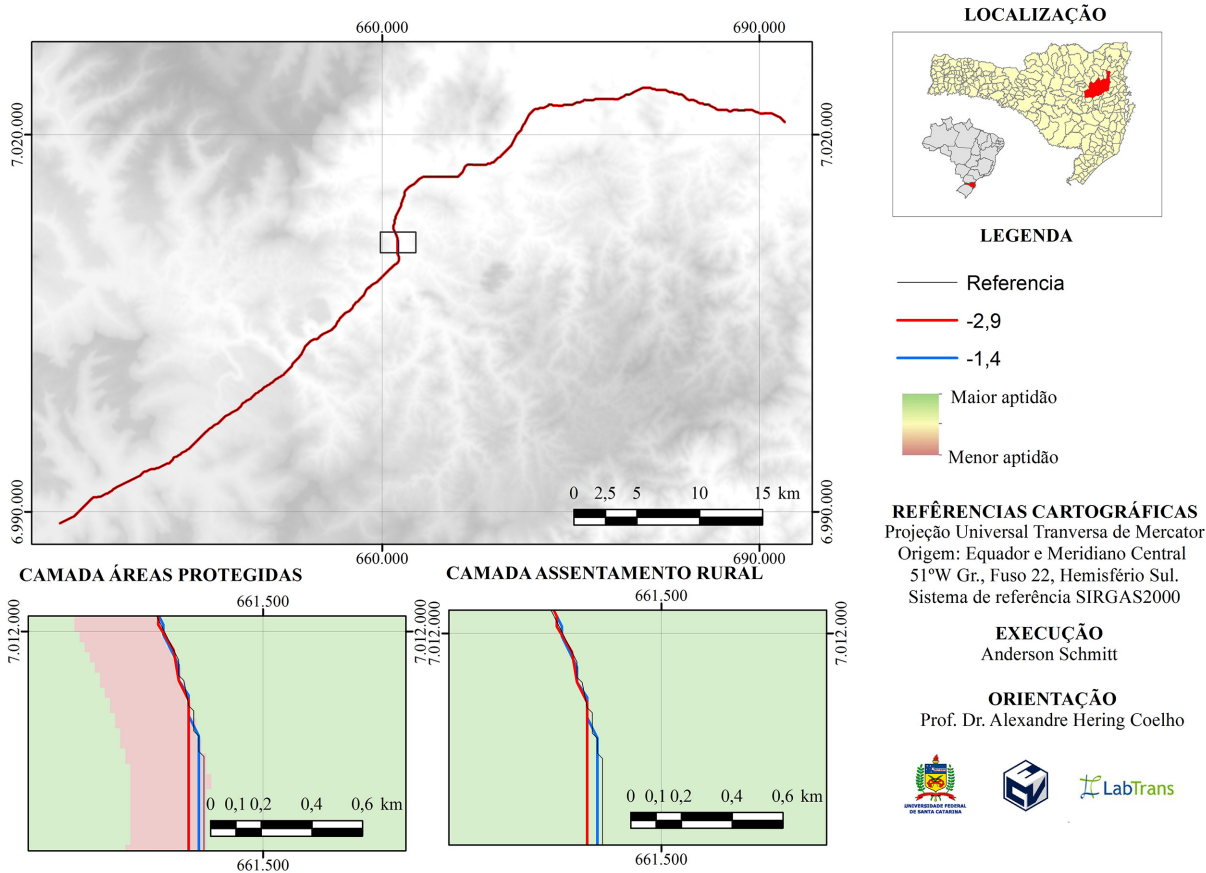


Figura 56: Mapa - distanciamentos legais x areas prioritárias para conservação

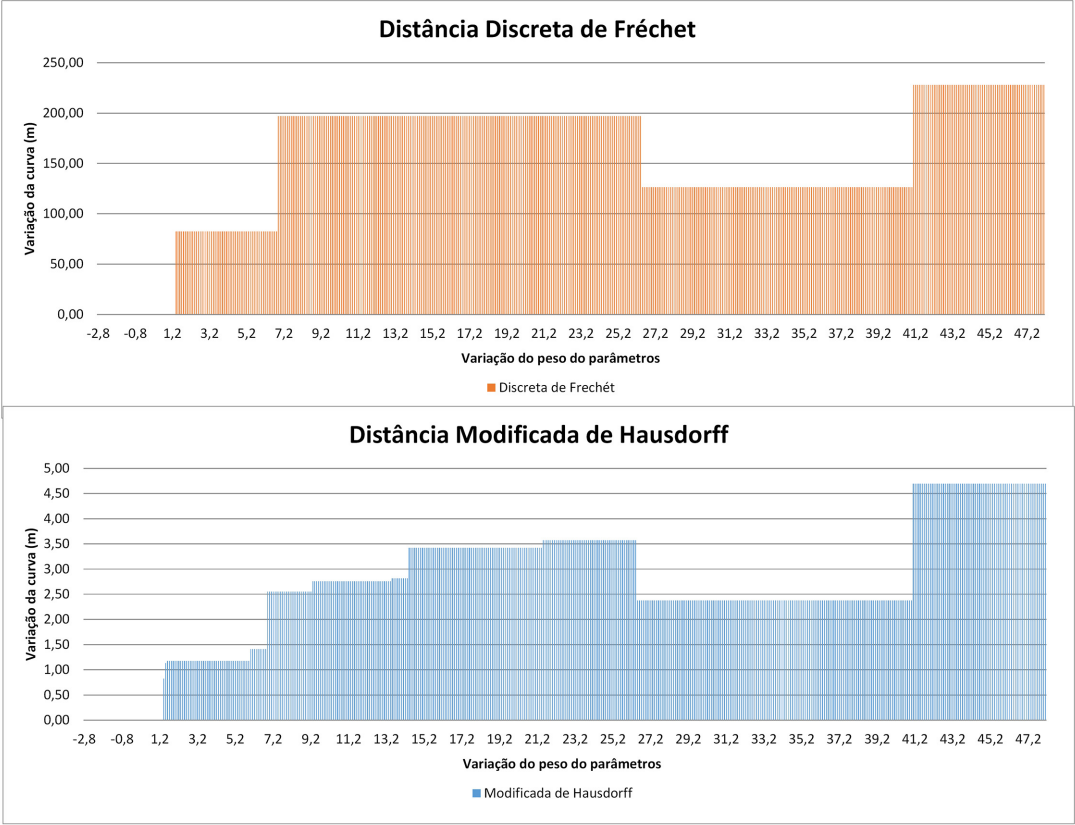
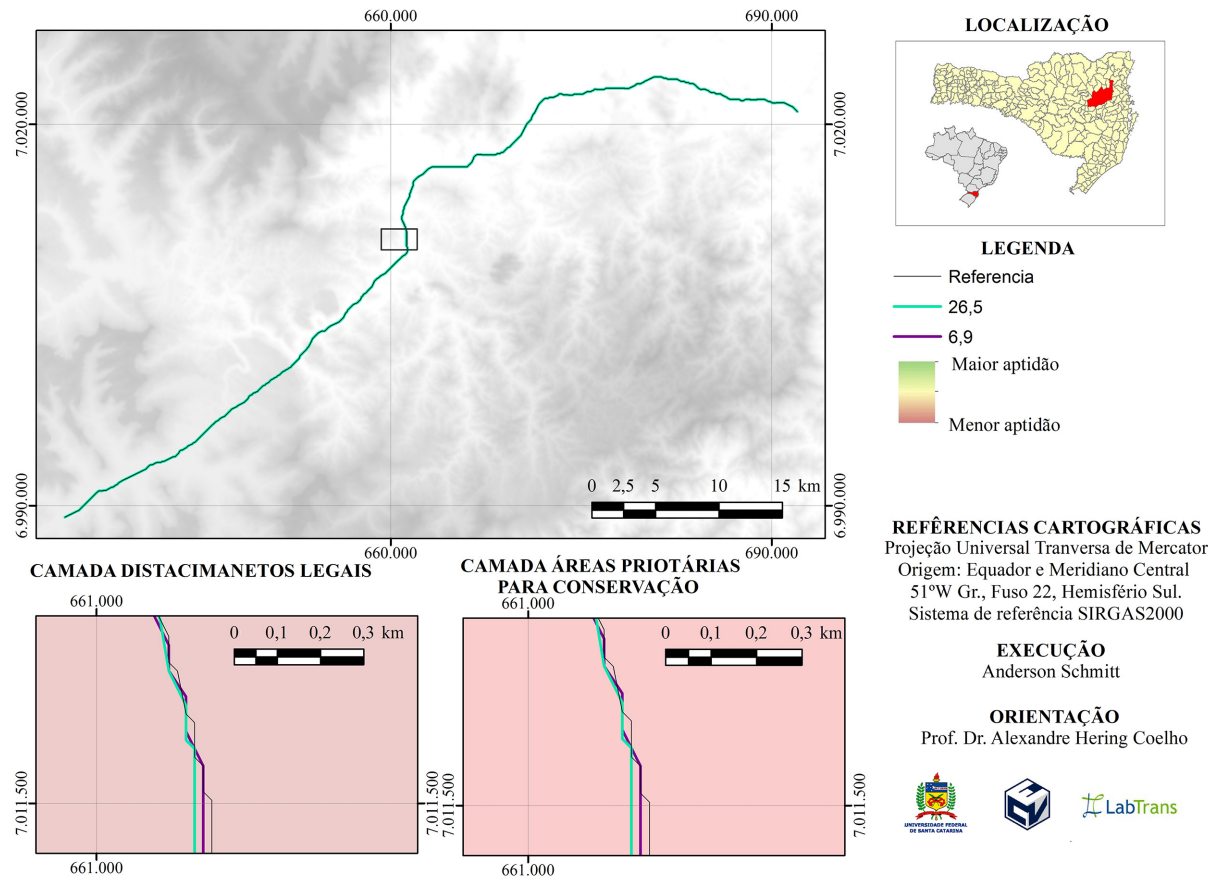


Figura 57: Mapa - distanciamentos legais x assentamento rural

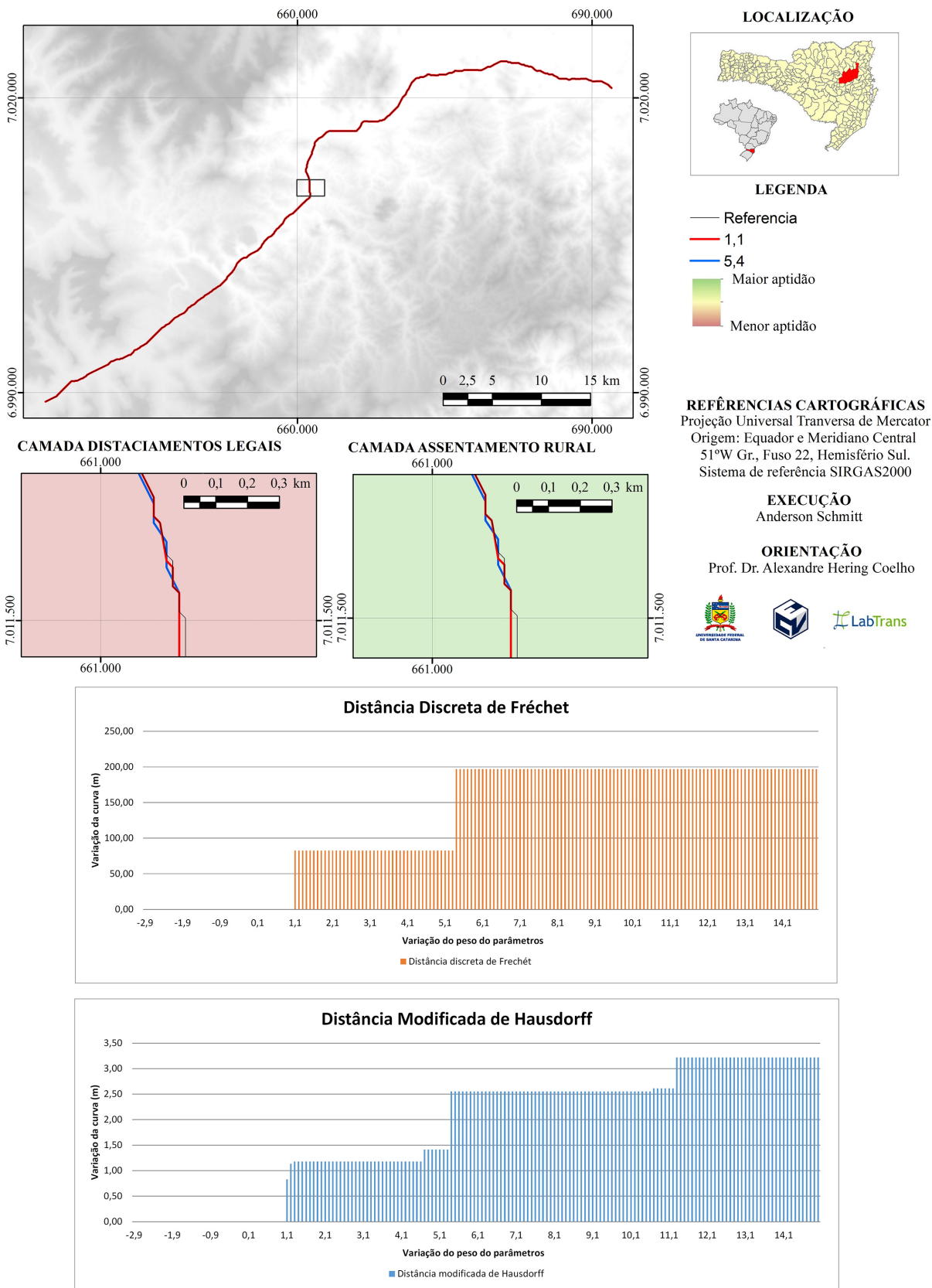


Figura 58: Mapa - declividade x hidrografia

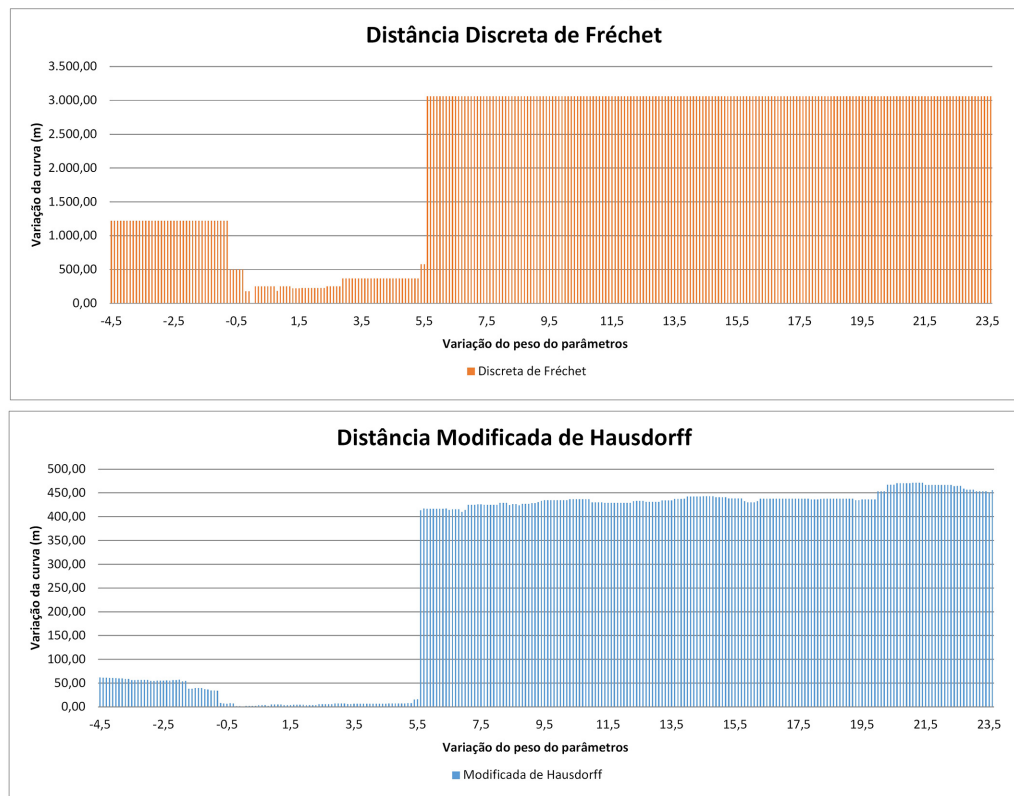
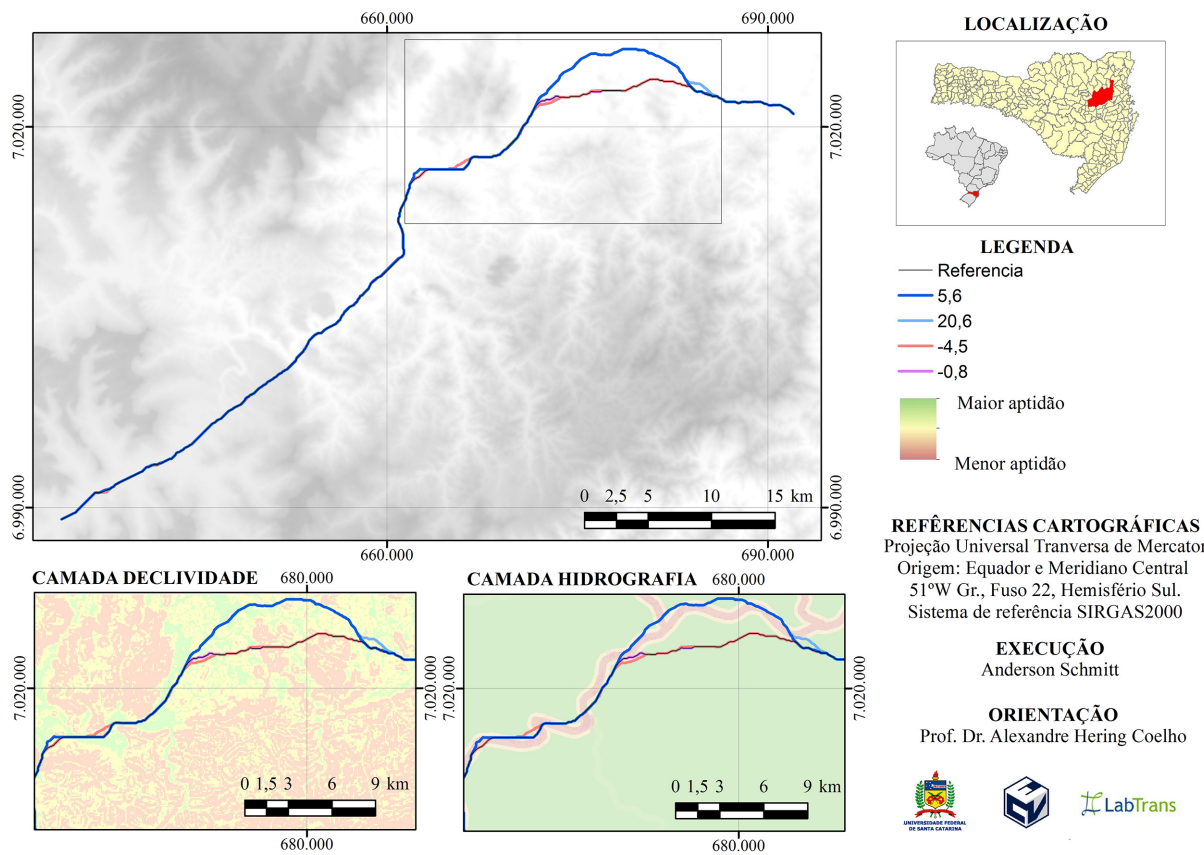




Figura 59: Mapa - declividade x acessos

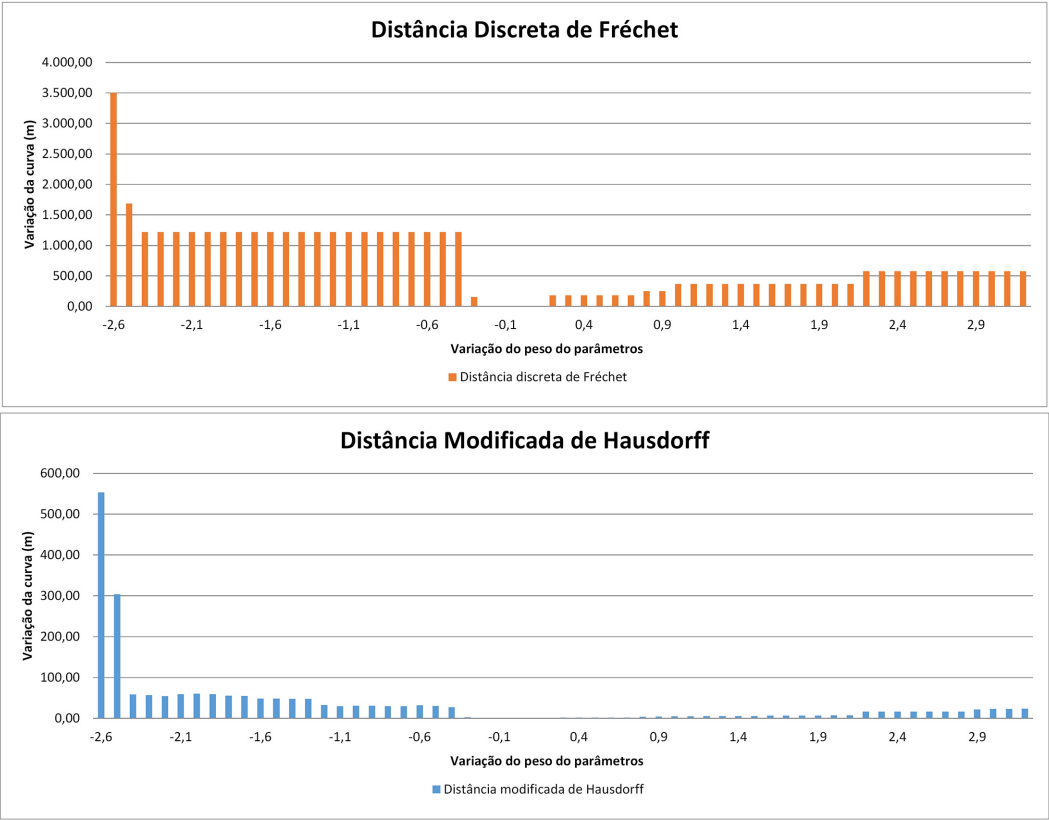
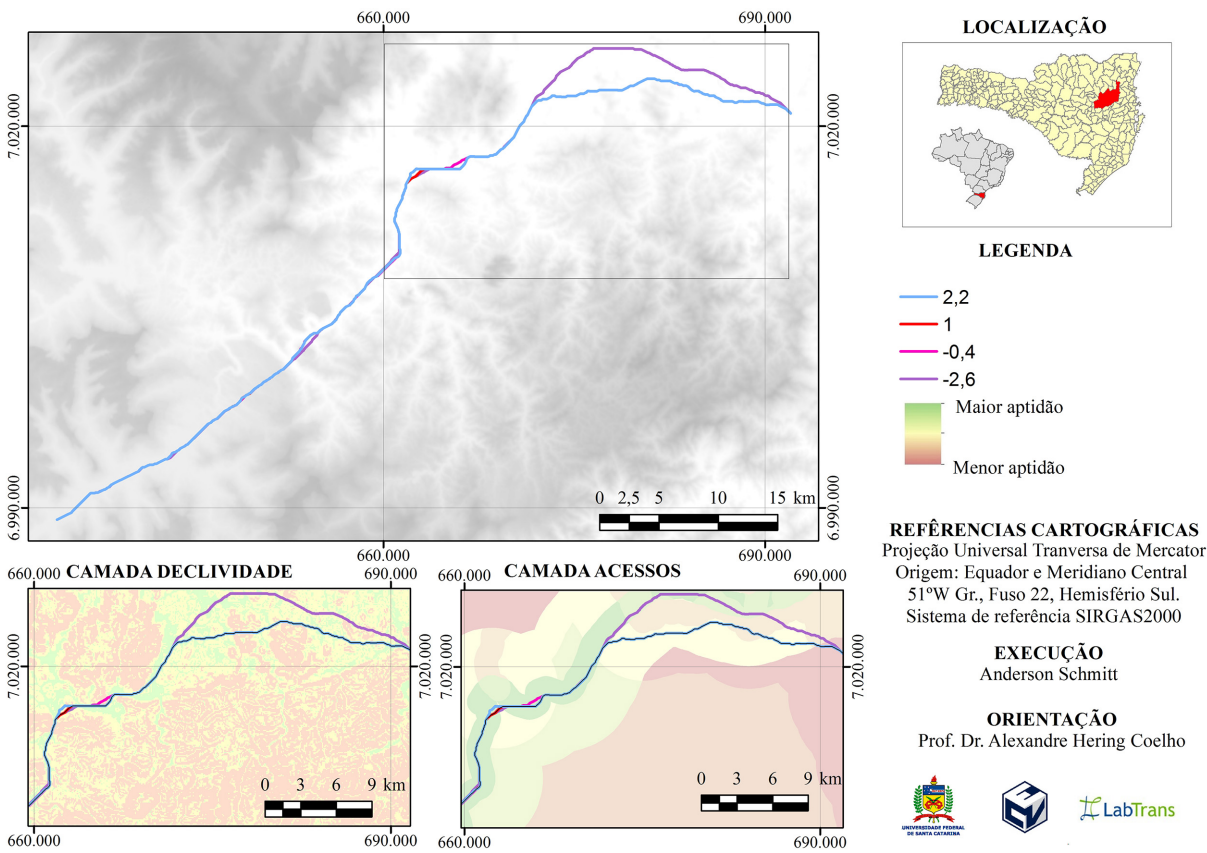


Figura 60: Mapa - declividade x áreas urbanas

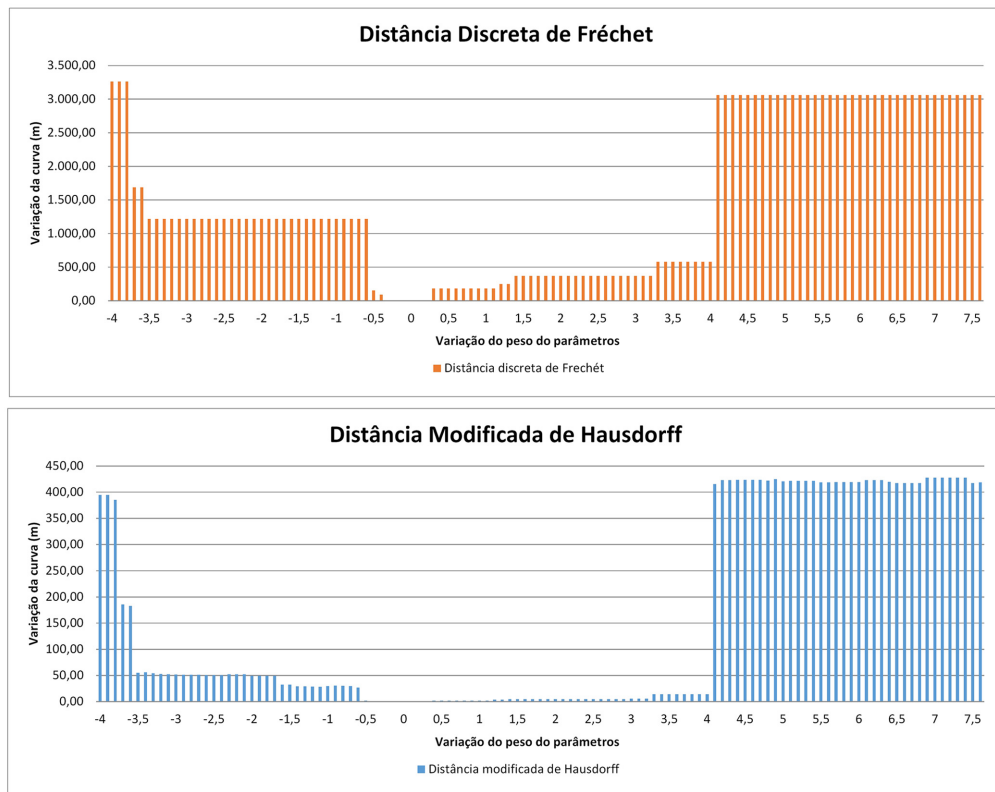
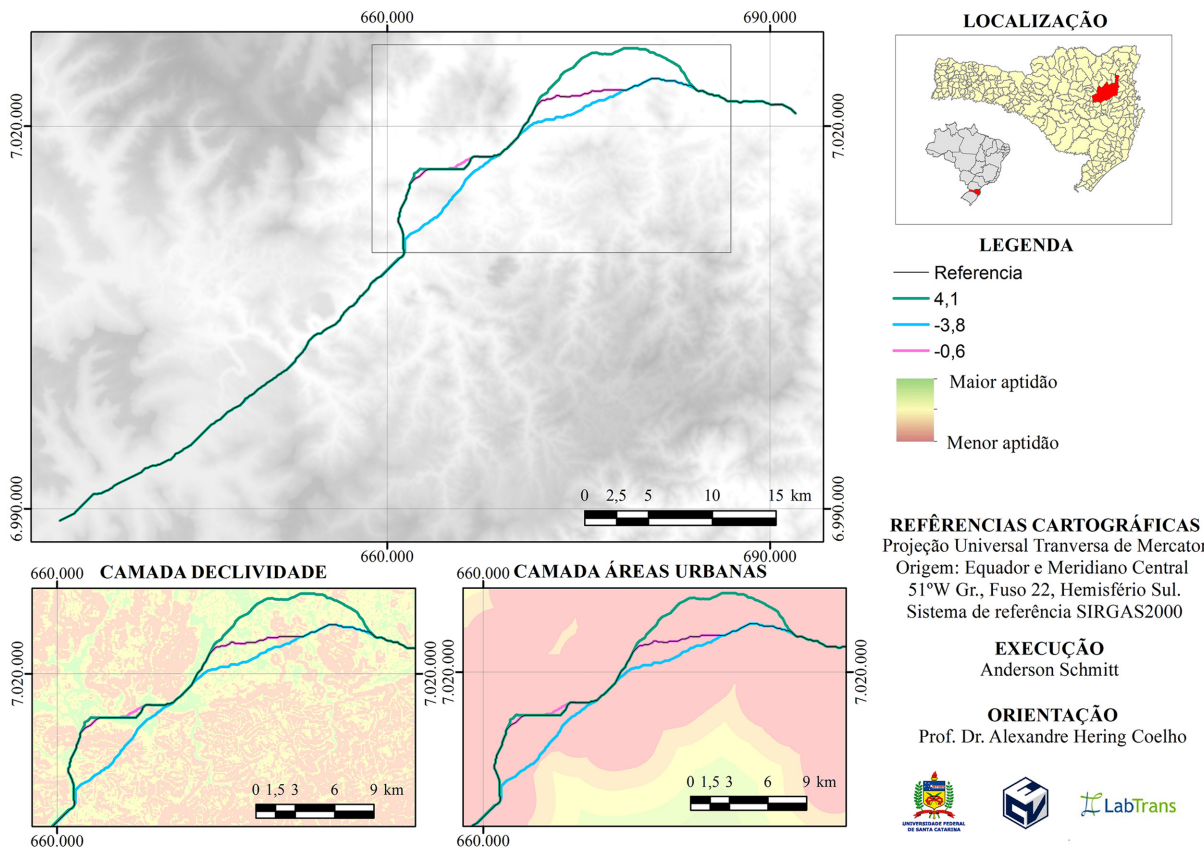


Figura 61: Mapa - declividade x solos

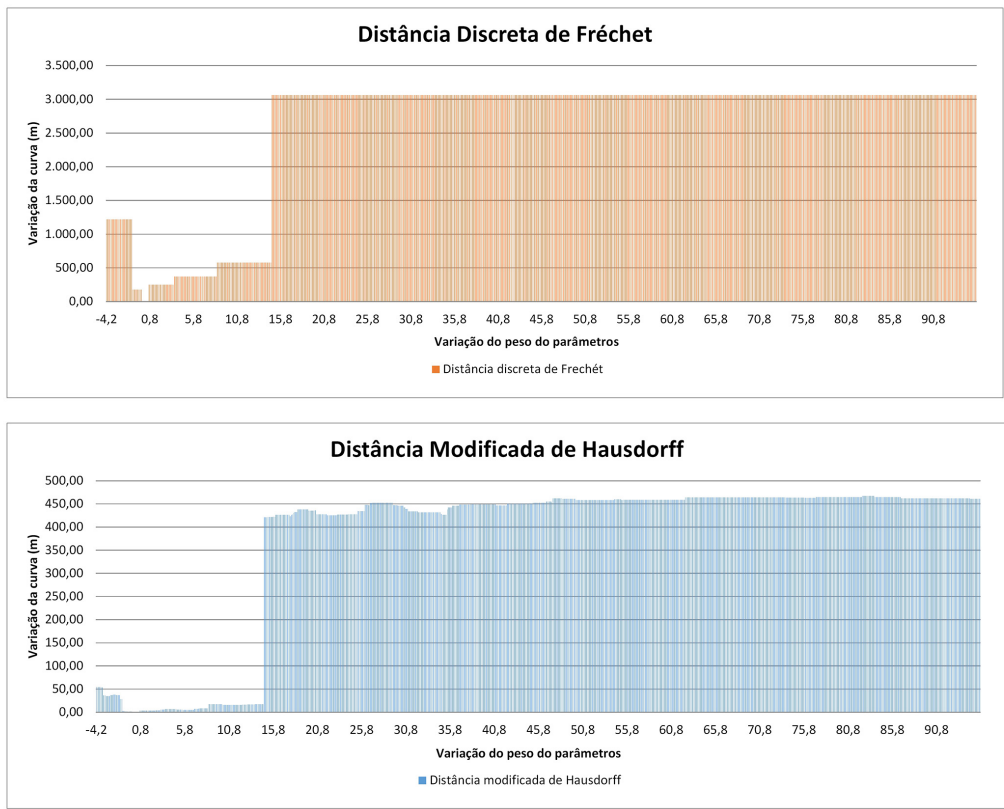
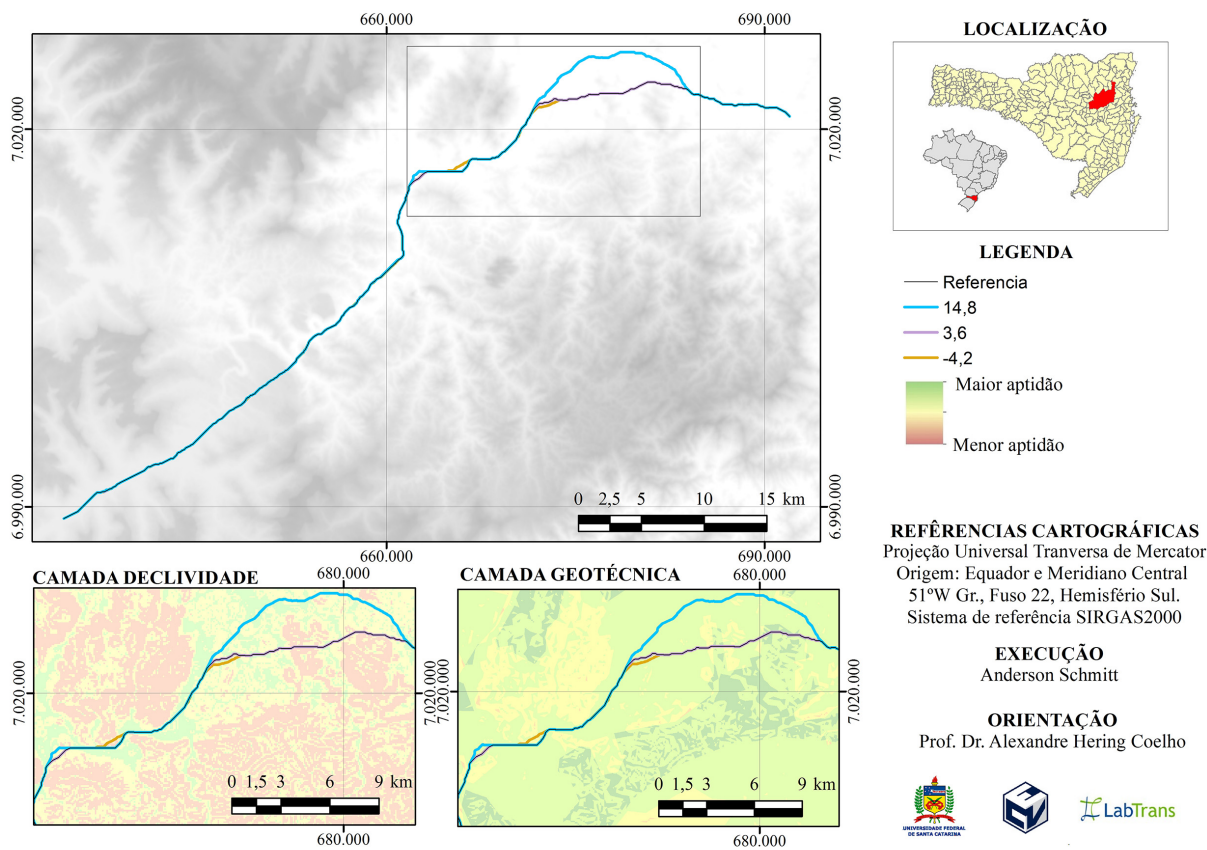




Figura 62: Mapa - hidrografia x acessos

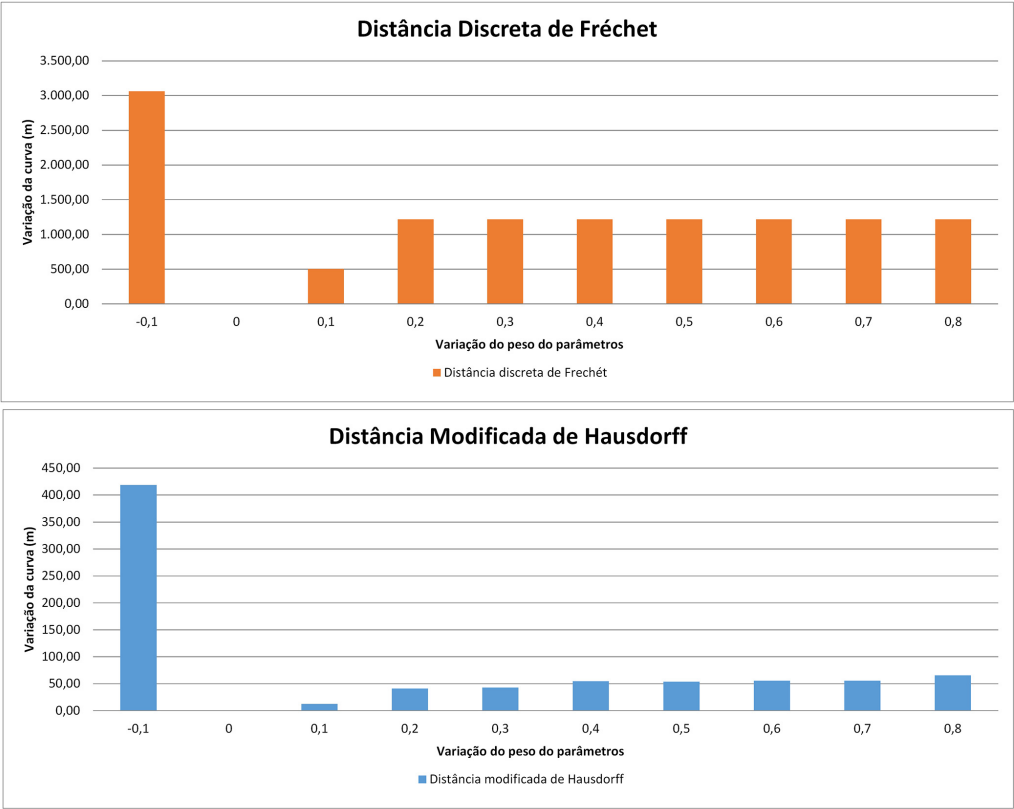
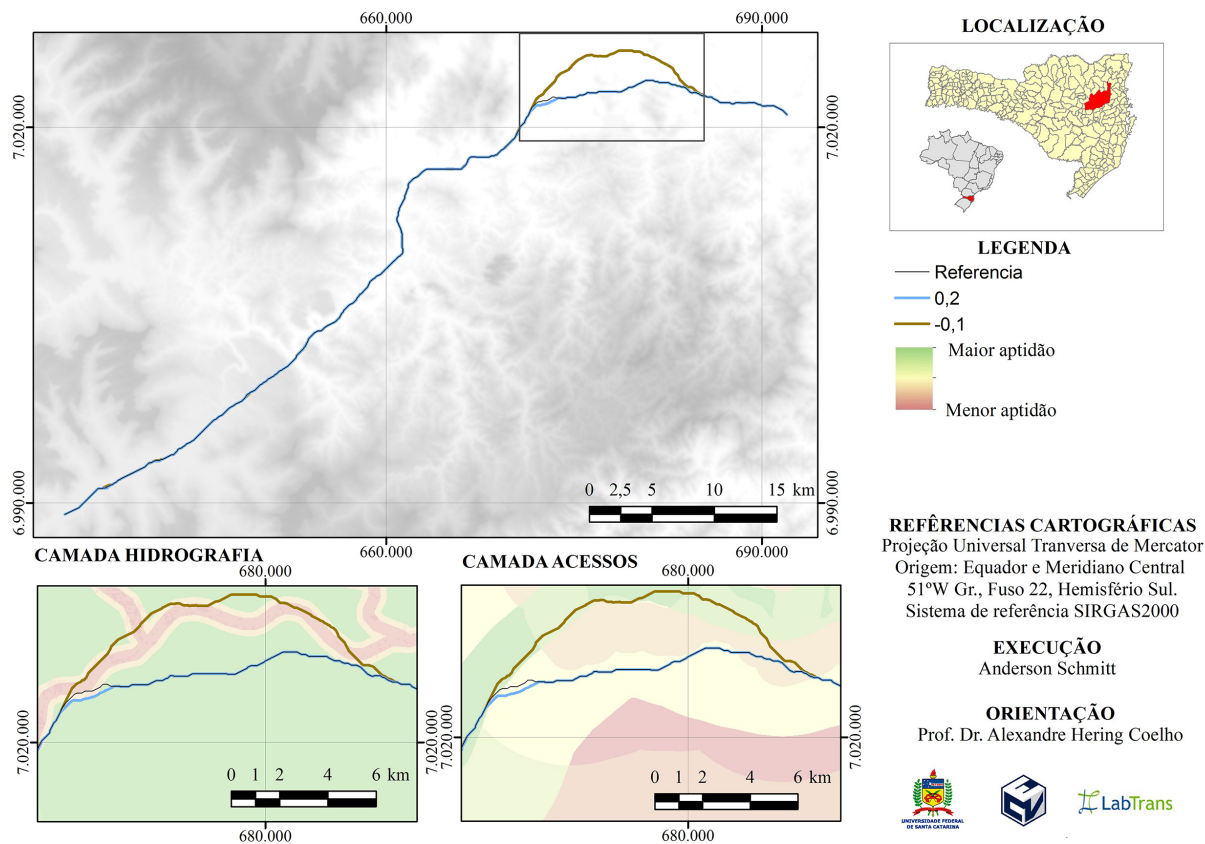


Figura 63: Mapa - hidrografia x áreas urbanas

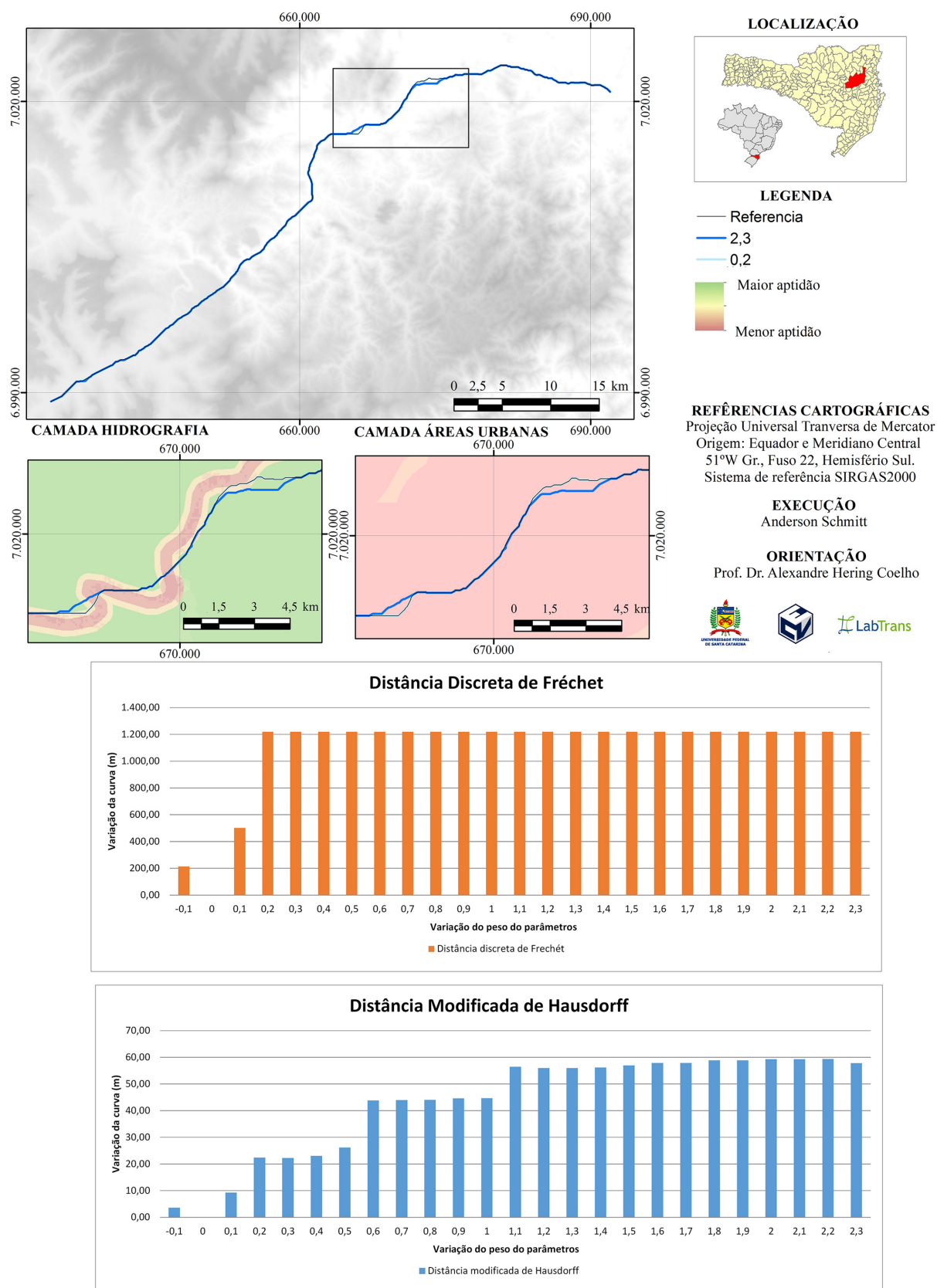


Figura 64: Mapa - hidrografia x solos

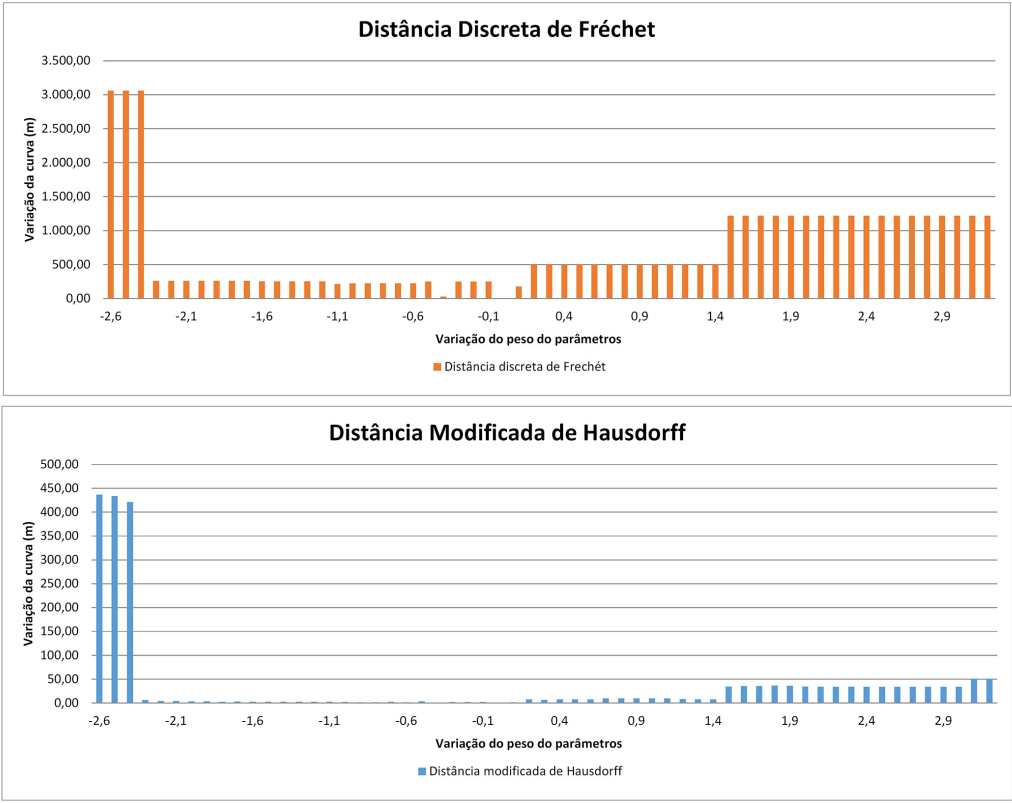
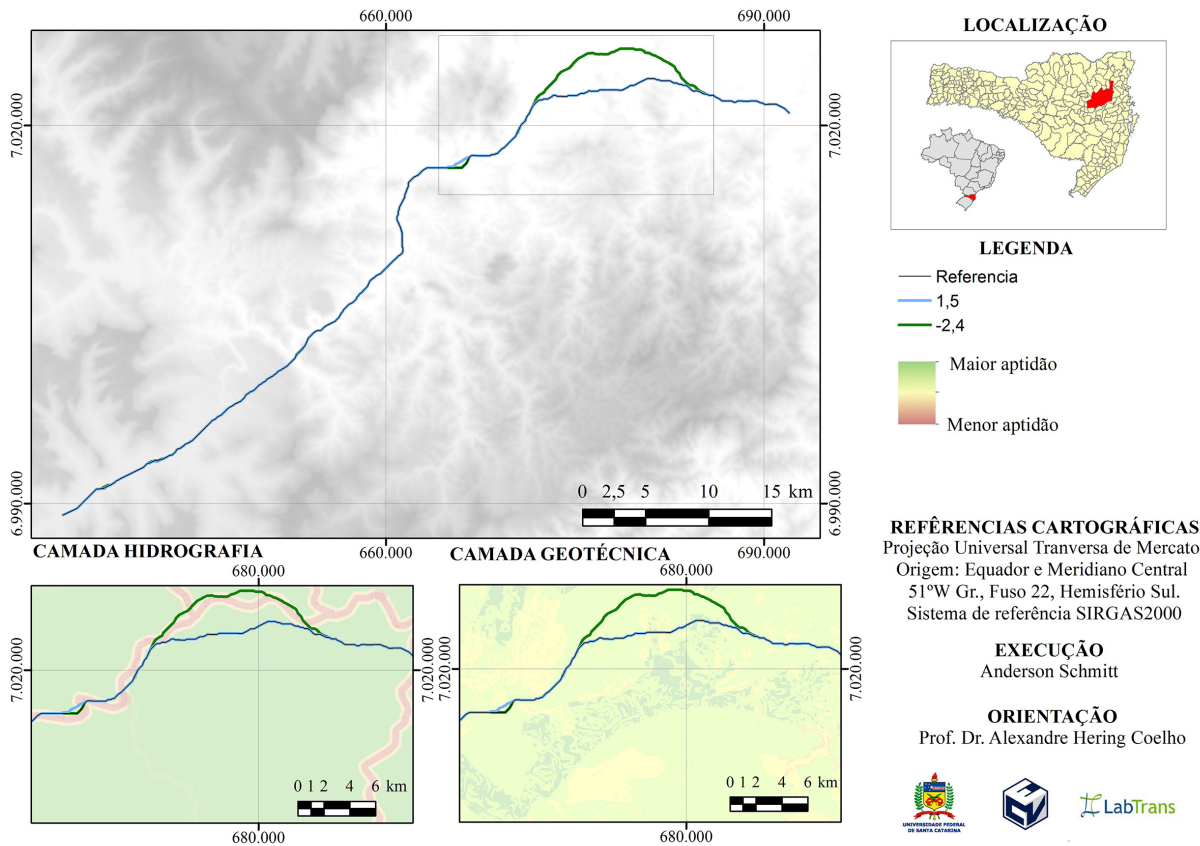


Figura 65: Mapa - acessos x áreas urbanas

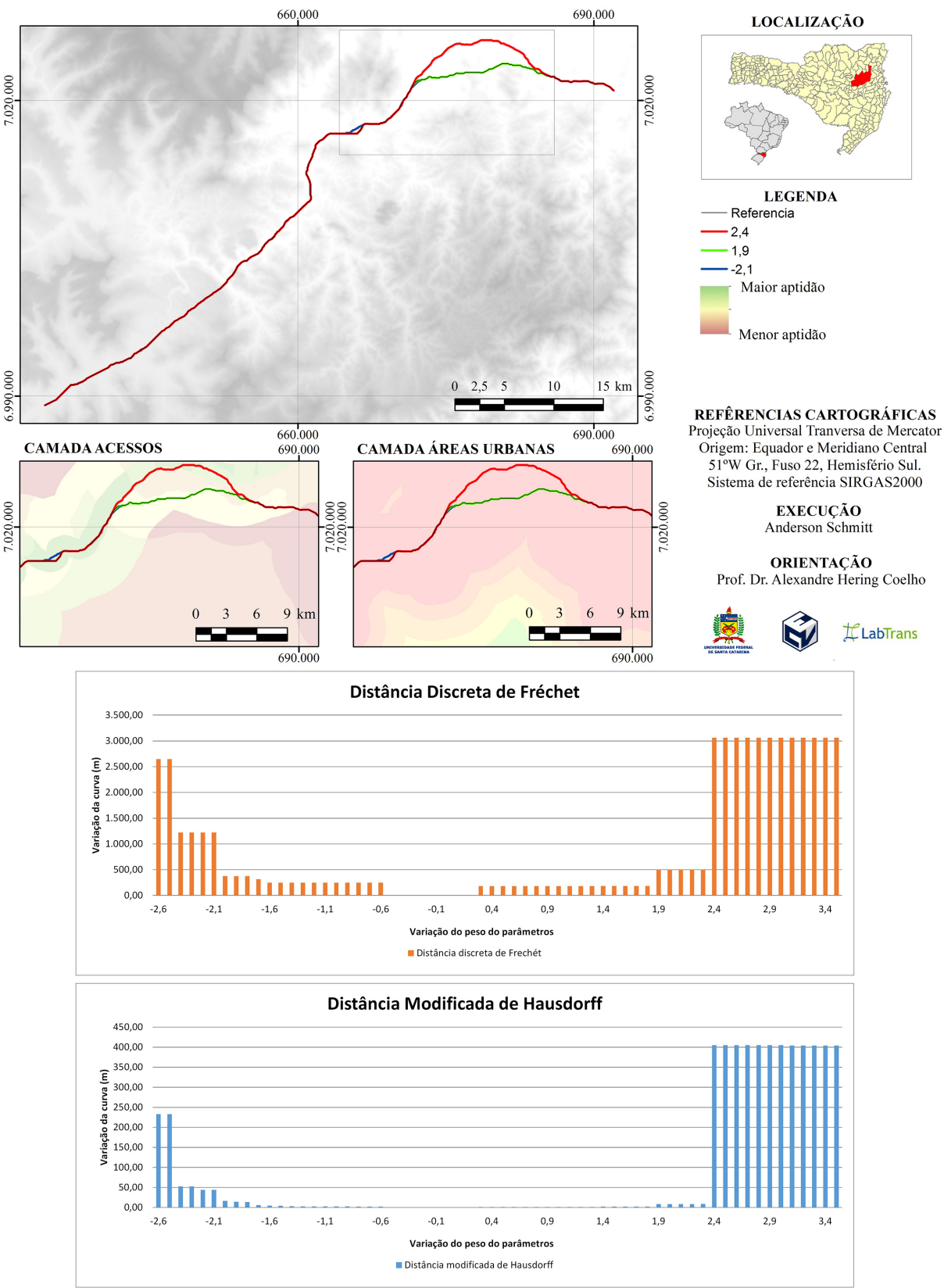


Figura 66: Mapa - acessos x solos

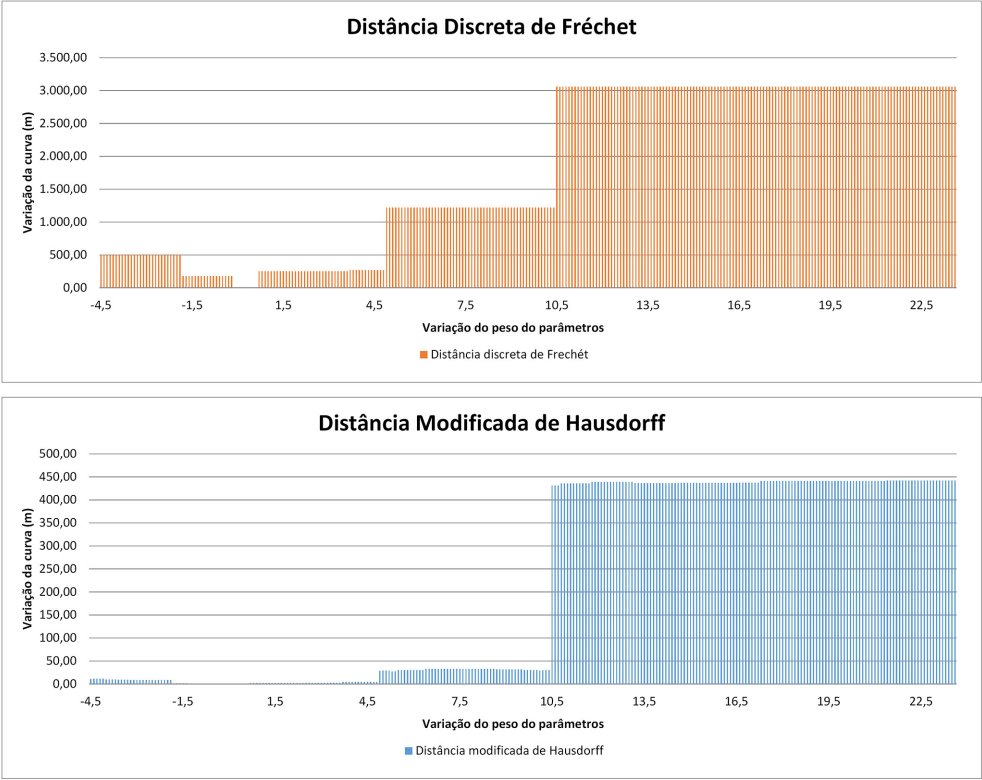
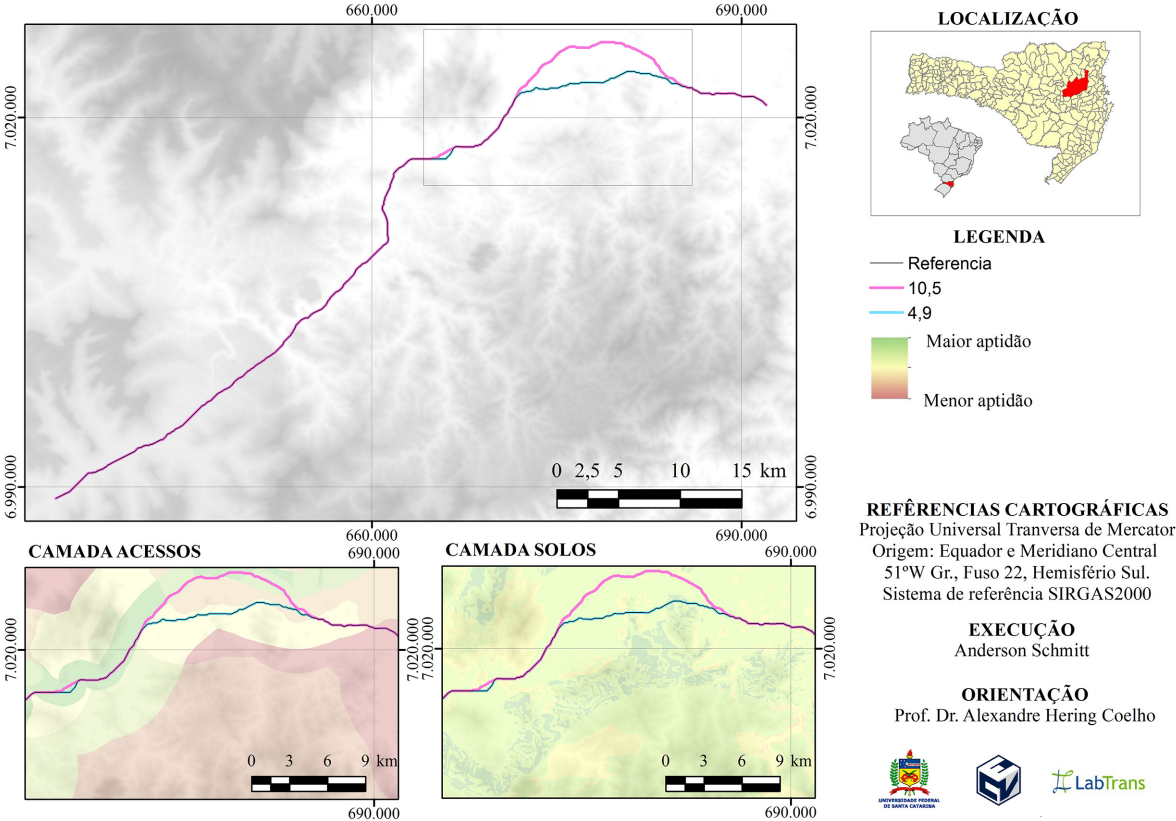




Figura 67: Mapa - áreas urbanas x solos

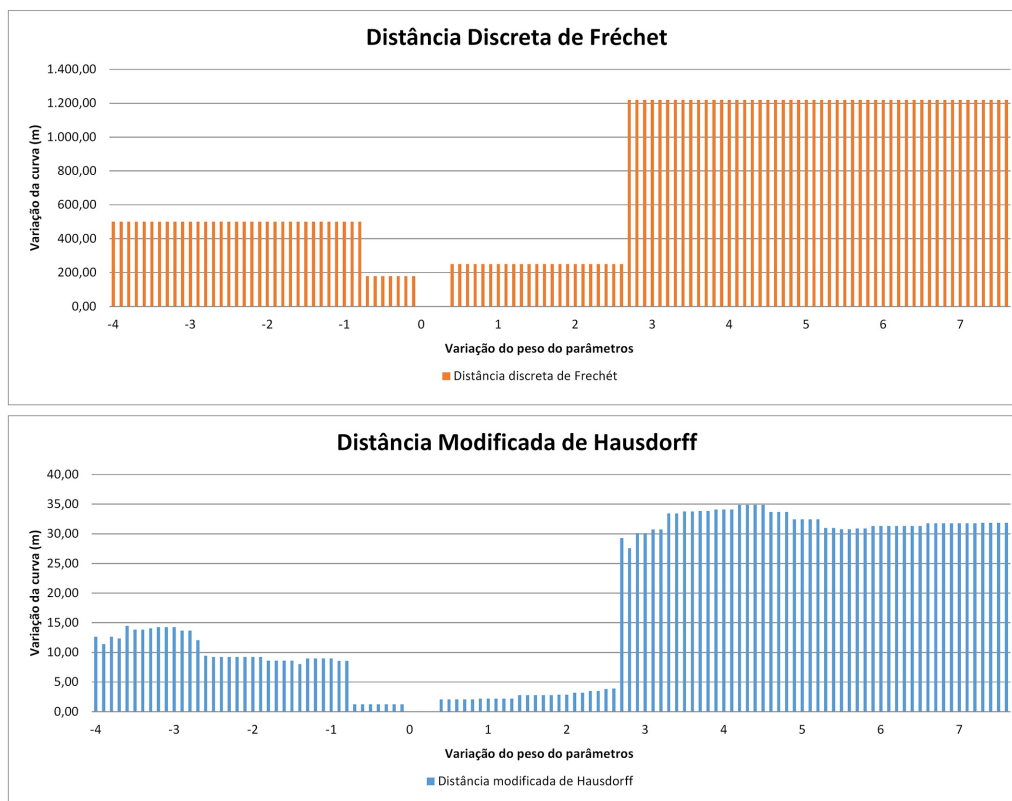
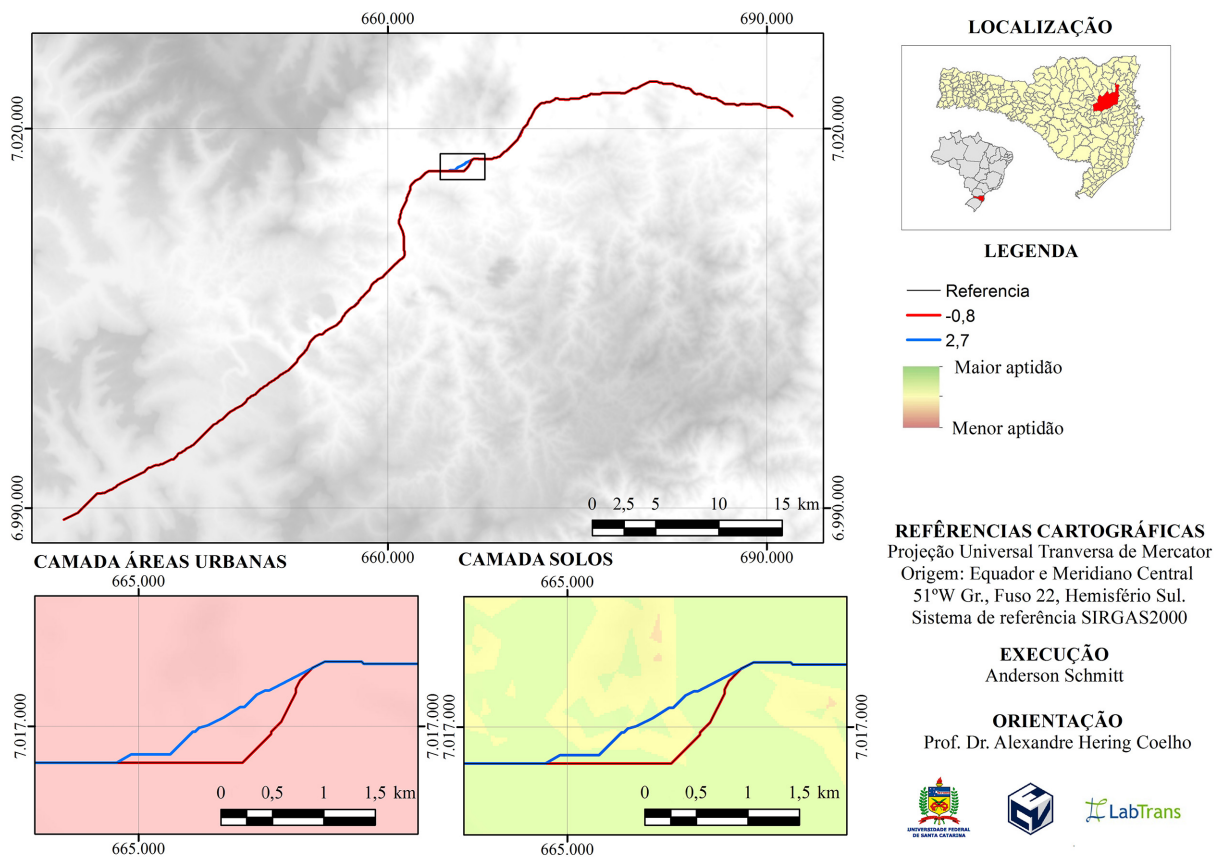


Figura 68: Mapa - técnico x ambiental

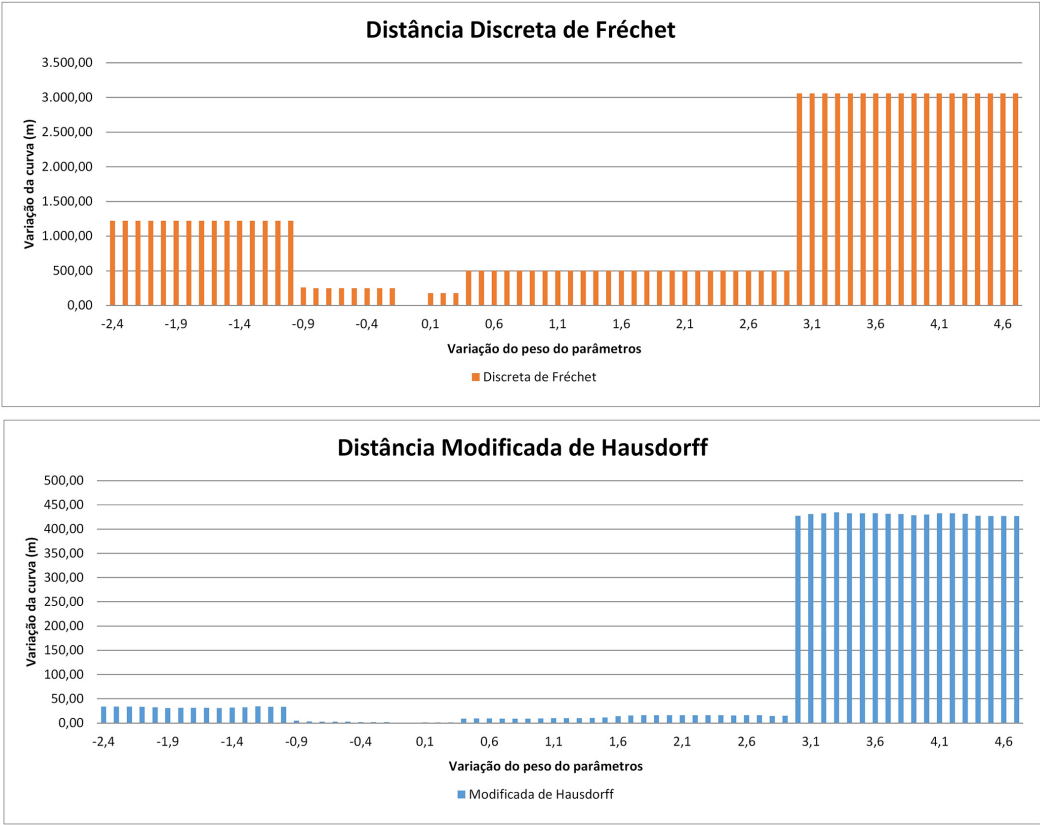
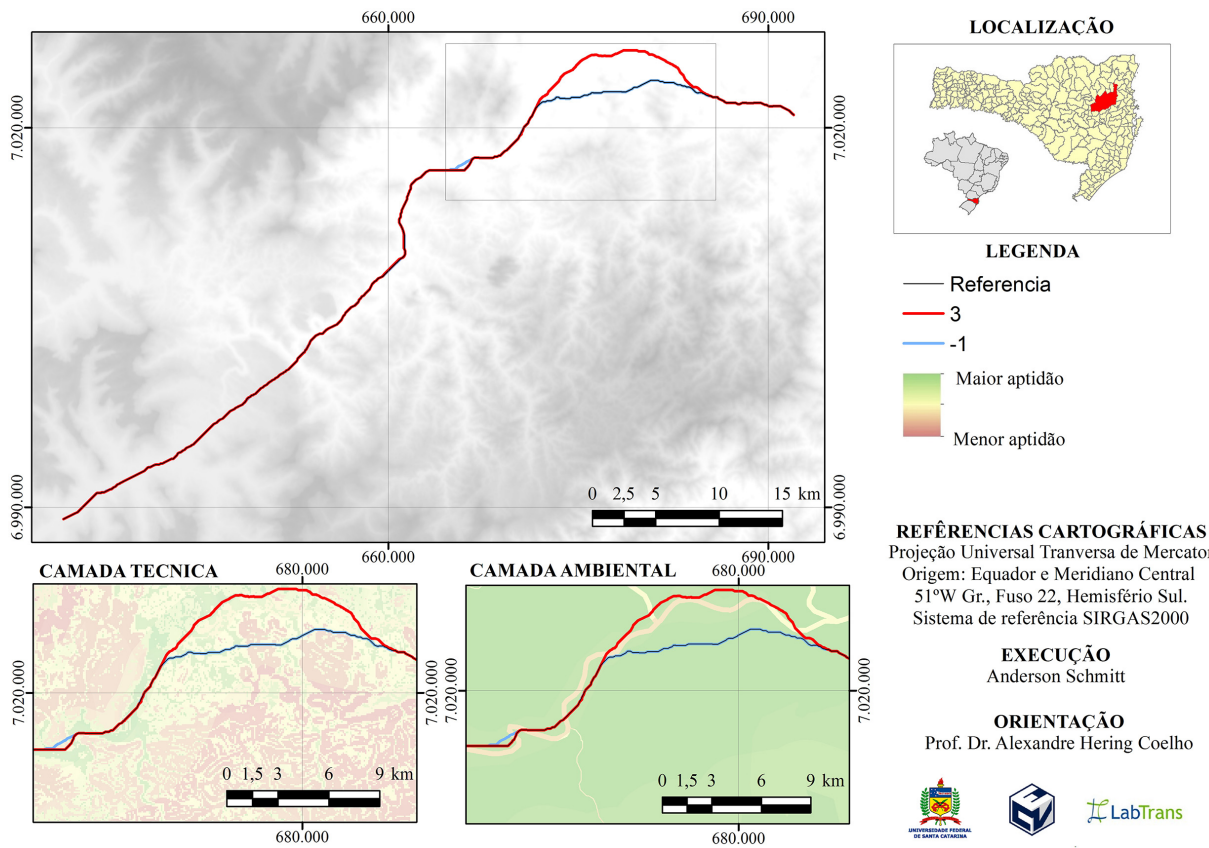


Figura 69: Mapa - técnico x socioeconômico

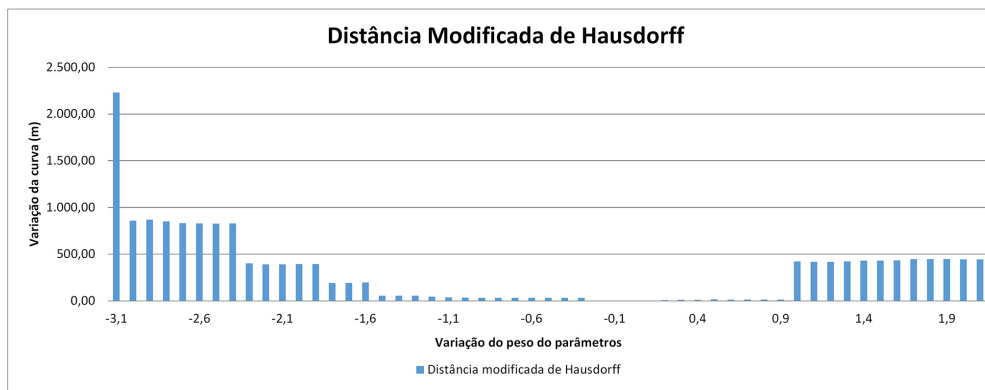
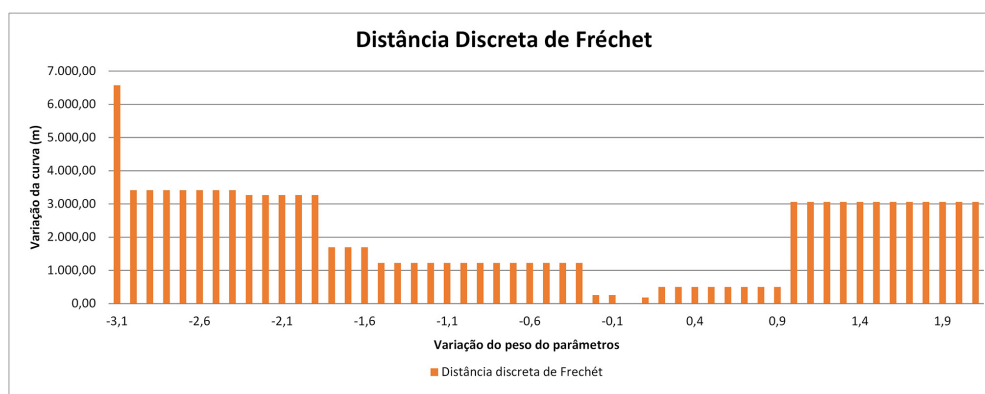
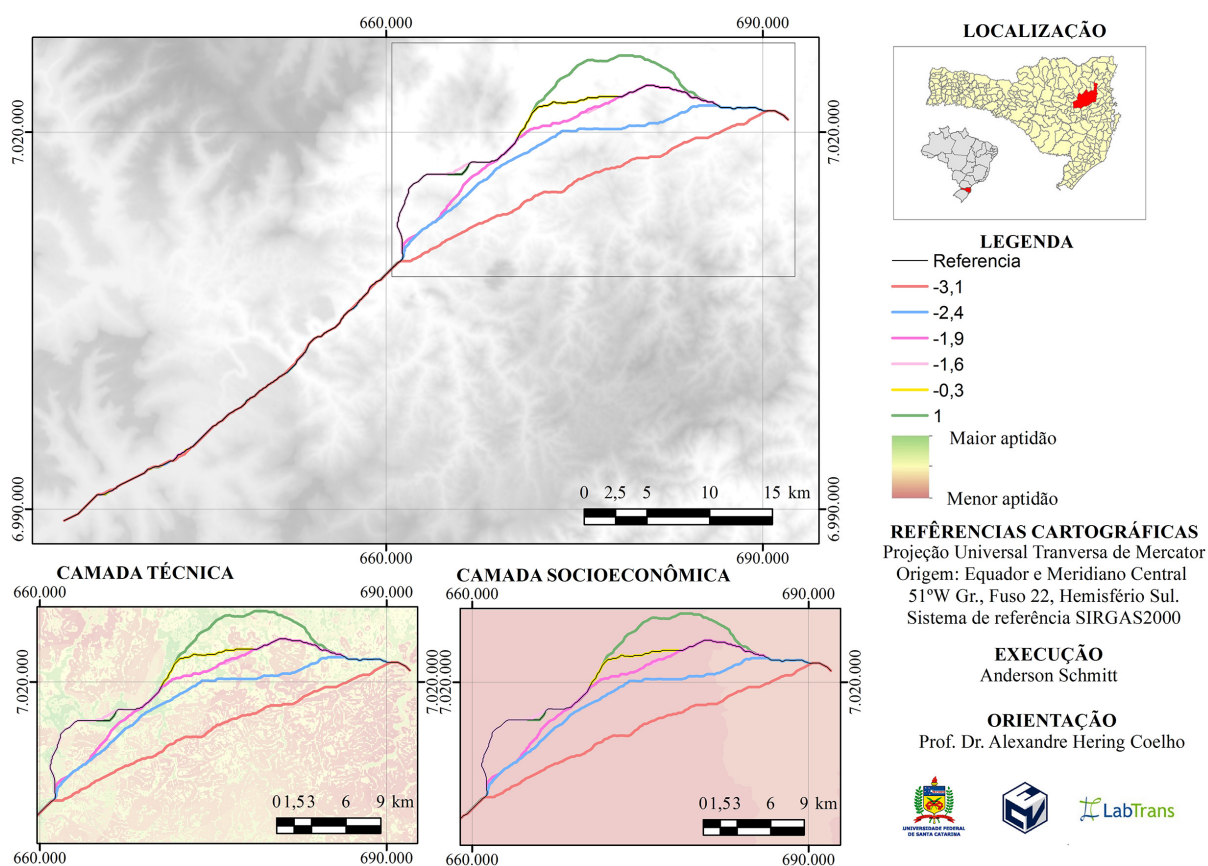
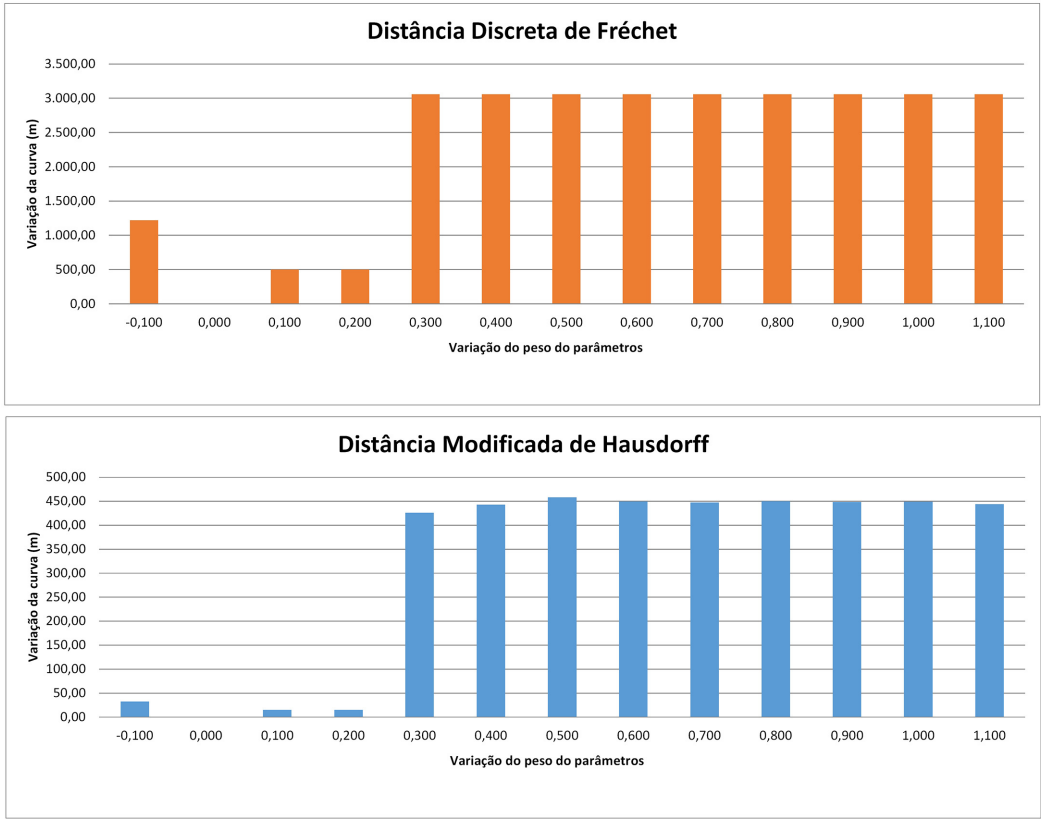
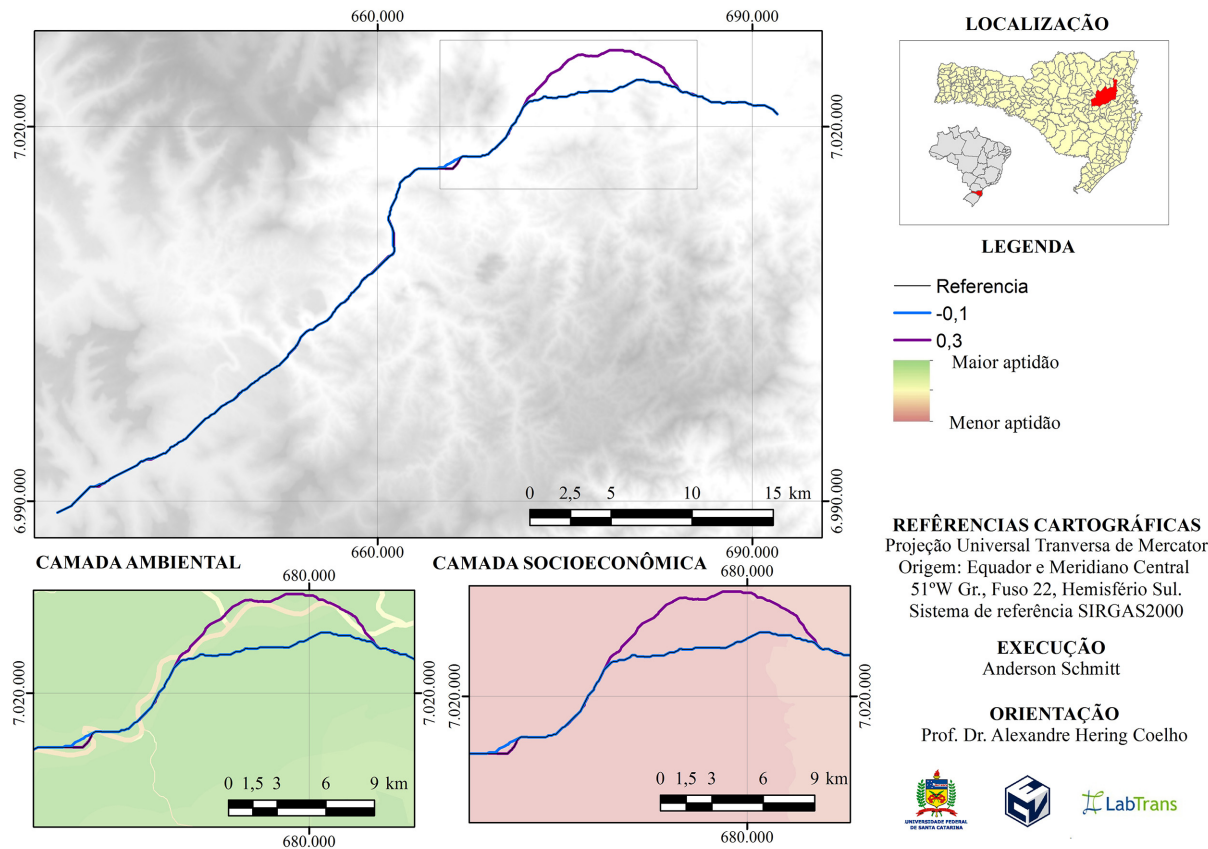




Figura 70: Mapa - ambiental x socioeconômico



## B SCRIPT

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2
3  # Prof. Alexandre H. Coelho
4  # Julho de 2016
5
6  # =====
7  # ===== DADOS DE ENTRADA =====
8
9  arquivoMatrizes = "/DadosMatrizEntradaAHP.xlsx"
10 maximo_CR = 0.1
11 RI_table = { 1:0.00, 2:0.00, 3:0.52, 4:0.9, 5:1.12, 6:1.24, 7:1.32, 8:1.41 }
12 incrementos = [ 0.1, -0.1 ]
13 arquivo_database = "resultados.sqlite"
14
15 # =====
16 # ===== IMPORTS =====
17
18 import sys
19 import datetime
20 import math
21 from scipy import linalg
22 import xlrd
23 import operator
24 import sqlite3 as lite
25 import commands
26 import numpy as np
27 import re
28 from oct2py import octave
29 octave.addpath( "octave" )
30
31 # =====
32 # ===== FUNCOES =====
33
34 def calculaCR( matriz, nLinhas ):
35
36     e_vals, e_vecs = linalg.eig( list( matriz ) )
37     index, max_eval = max( enumerate( e_vals.real ), key=operator.itemgetter( 1 ) )
38     e_vecs_transform = zip( *e_vecs.real )
39     RI = RI_table[ nLinhas ]
40     CI = ( max_eval.real - float( nLinhas ) ) / ( float( nLinhas ) - 1.0 )
41     CR = CI / RI
42     return CR
43
44 def run( input ):
45     print "-----"

```

---

```

46 print "comando: %s" % input
47 result = commands.getoutput( input )
48 if "ERROR" in result:
49 print result
50 sys.exit( 0 )
51 return result
52
53 def getMCExpressionForSheet( expression_sheet ):
54 expression_worksheet = workbook.sheet_by_name( expression_sheet )
55 expression_nRows = expression_worksheet.nrows - 1
56 expression_nCols = expression_worksheet.ncols - 1
57
58 camadas = []
59 for i in range( expression_nRows ):
60 camadas.append( expression_worksheet.cell_value( i + 1, 0 ) )
61
62 expression_data = []
63 if expression_sheet == sheet_var:
64 expression_data = data_temp
65 else:
66 for i in range( expression_nRows ):
67 linha = []
68 for j in range( expression_nCols ):
69 linha.append( expression_worksheet.cell_value( i + 1, j + 1 ) )
70 expression_data.append( linha )
71
72 expression_soma = 0.0
73 for i in range( expression_nRows ):
74 rnop = math.pow( reduce( operator.mul, expression_data[i], 1 ), ( 1. / float(
        expression_nRows ) ) )
75 expression_soma += rnop
76
77 calculoString = ""
78 for i in range( expression_nRows ):
79 peso = math.pow( reduce( operator.mul, expression_data[i], 1 ), ( 1. / float(
        expression_nRows ) ) ) / expression_soma
80 calculoString += "%s*%s+" % ( peso, camadas[i] )
81 calculoString = calculoString[:len(calculoString)-1]
82 return calculoString
83
84
85 # https://www.snip2code.com/Snippet/76076/Fr-chet-Distance-in-Python
86 def euc_dist(pt1,pt2):
87 return math.sqrt((pt2[0]-pt1[0])*(pt2[0]-pt1[0])+(pt2[1]-pt1[1])*(pt2[1]-pt1[1]))
88
89 def _c(ca,i,j,P,Q):
90 if ca[i,j] > -1:
91 return ca[i,j]
92 elif i == 0 and j == 0:

```

```
93 ca[i,j] = euc_dist(P[0],Q[0])
94 elif i > 0 and j == 0:
95 ca[i,j] = max(_c(ca,i-1,0,P,Q),euc_dist(P[i],Q[0]))
96 elif i == 0 and j > 0:
97 ca[i,j] = max(_c(ca,0,j-1,P,Q),euc_dist(P[0],Q[j]))
98 elif i > 0 and j > 0:
99 ca[i,j] = max(min(_c(ca,i-1,j,P,Q),_c(ca,i-1,j-1,P,Q),_c(ca,i,j-1,P,Q)),euc_dist(P[i],Q[j
    ]))
100 else:
101 ca[i,j] = float("inf")
102 return ca[i,j]
103
104 """ Computes the discrete frechet distance between two polygonal lines
105 Algorithm: http://www.kr.tuwien.ac.at/staff/eiter/et-archive/cdtr9464.pdf
106 P and Q are arrays of 2-element arrays (points)
107 """
108 def frechetDist(P,Q):
109 ca = np.ones((len(P),len(Q)))
110 ca = np.multiply(ca,-1)
111 return _c(ca,len(P)-1,len(Q)-1,P,Q)
112
113 # =====
114
115 def pegaPoligonalGRASS( nome ):
116 pol_ascii = run( "v.out.ascii input=%s format=standard" % nome )
117 pol_ascii_lines = pol_ascii.split( "\n" )
118 vertices = []
119 for line in pol_ascii_lines:
120 if re.findall( r'^.[0-9]+\.', line ):
121 partes = line.strip().split( " " )
122 x = float( partes[0] )
123 y = float( partes[1] )
124 vertices.append( [ x, y ] )
125 return vertices
126
127
128 def aplicaAHP():
129
130 # AMBIENTAL
131 run( "r.mapcalc AbPap='%s'" % getMCExpressionForSheet( "1-AreasProtegidas" ) )
132 run( "r.mapcalc AbPDI='%s'" % getMCExpressionForSheet( "1-DistanciamentoLegais" ) )
133 run( "r.mapcalc AbP='%s'" % getMCExpressionForSheet( "2-Ambiental" ) )
134
135 # TRCNICO
136 run( "r.mapcalc TePac='%s'" % getMCExpressionForSheet( "1-Acessos" ) )
137 run( "r.mapcalc TePHi='%s'" % getMCExpressionForSheet( "1-Hidrografia" ) )
138 run( "r.mapcalc TeP='%s'" % getMCExpressionForSheet( "2-Tecnico" ) )
139
140 # SOCIOECONOMICO
```

---

```

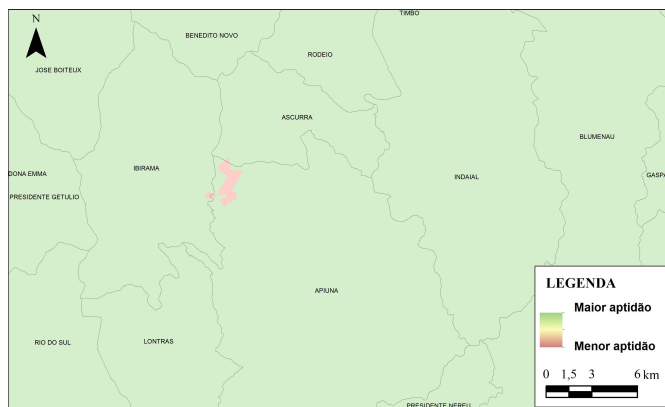
141 run( "r.mapcalc SePLt='%s'" % getMCExpressionForSheet( "1-LavourasTemporarias" ) )
142 run( "r.mapcalc SePLp='%s'" % getMCExpressionForSheet( "1-LavourasPermanetes" ) )
143 run( "r.mapcalc SePre='%s'" % getMCExpressionForSheet( "1-Rebanhos" ) )
144 run( "r.mapcalc SeP='%s'" % getMCExpressionForSheet( "2-Socieconomico" ) )
145
146 # RESULTADO
147 run( "r.mapcalc Resultado='%s'" % getMCExpressionForSheet( "3-Resultado" ) )
148
149 # GERANDO A POLIGONAL
150 run( "r.mapcalc result_invert='5.0-Resultado'" )
151 run( "r.cost -k -n input=result_invert output=Custo start_points=StartPoint stop_points=
      EndPoint --overwrite" )
152 run( "g.remove vect=CaminhoTemp" )
153 run( "g.remove vect=Caminho" )
154 run( "r.drain input=Custo output=CaminhoTemp vector_points=EndPoint voutput=CaminhoTemp
      --overwrite" )
155 run( "v.generalize input=CaminhoTemp output=Caminho method=douglas threshold=10 --
      overwrite" )
156
157 return pegaPoligonalGRASS( "Caminho" )
158
159 # =====
160 # ===== ROTINA =====
161
162 start_time = datetime.datetime.now()
163
164 con = lite.connect( arquivo_database , isolation_level=None )
165 with con:
166     cur = con.cursor()
167
168     cur.execute( "DROP TABLE IF EXISTS resultados" )
169     cur.execute( "CREATE TABLE resultados (sheet text, a_rel text, b_rel text, a_valor float,
          b_valor float, cr float, frechet float, hausdorff float)" )
170
171     pol_referencia = pegaPoligonalGRASS( "Referencia" )
172
173     workbook = xlrd.open_workbook( arquivoMatrizes )
174     sheets = workbook.sheet_names()
175
176     for sheet in sheets:
177
178         print sheet
179
180         sheet_var = sheet
181
182         worksheet = workbook.sheet_by_name( sheet )
183         nRows = worksheet.nrows - 1
184         nCols = worksheet.ncols - 1
185

```

```
186 data = []
187 for i in range( nRows ):
188     linha = []
189     for j in range( nCols ):
190         linha.append( float( worksheet.cell_value( i + 1, j + 1 ) ) )
191     data.append( linha )
192
193 if len( data ) > 2:
194     for i in range( len( data ) ):
195         for j in range( len( data[0] ) ):
196             if j > i and j > 0:
197                 a_rel = worksheet.cell_value( i + 1, 0 ).encode('utf8')
198                 b_rel = worksheet.cell_value( 0, j + 1 ).encode('utf8')
199                 print "Processando a çãrelao %s:%s" % ( a_rel, b_rel )
200     plot_data = []
201     frechet_data = []
202     hausdorff_data = []
203     for incremento in incrementos:
204         data_temp = [x[:] for x in data]
205         if incremento == 0.1:
206             print "para cima..."
207         else:
208             print "para baixo..."
209         conta = 0.0
210         continua = True
211         while continua:
212             if data[i][j] + incremento * conta > 0:
213                 data_temp[i][j] = data[i][j] + incremento * conta
214                 data_temp[j][i] = 1.0 / ( data[i][j] + incremento * conta )
215             CR = calculaCR( data_temp, nRows )
216             poligonal = aplicaAHP()
217             frechet = frechetDist( pol_referencia, poligonal )
218             hausdorff = octave.ModHausdorffDist( pol_referencia, poligonal )
219             if CR > 0.0 and CR < maximo_CR:
220                 insertString = "INSERT INTO resultados (sheet, a_rel, b_rel, a_valor, b_valor, cr,
                                frechet, hausdorff) VALUES ('%s','%s','%s',%s,%s,%s,%s,%s,%s)" % ( sheet, a_rel, b_rel,
                                data_temp[i][j], data_temp[j][i], CR, frechet, hausdorff )
221             print insertString
222             cur.execute( insertString )
223             conta += 1.0
224         else:
225             continua = False
226     else:
227         continua = False
228     con.close()
229     print "Fim!"
230     print "Tempo de processamento = " + str(datetime.datetime.now() - start_time) + "
        segundos"
231     print " "
```

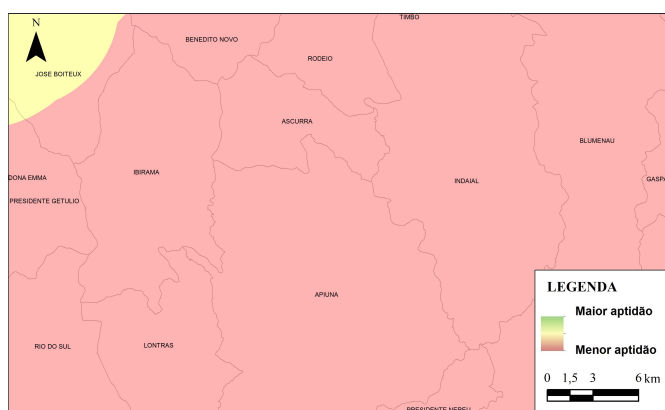
## C CAMADAS GEOGRÁFICAS

Figura 71: Camada - unidade de conservação de proteção integral



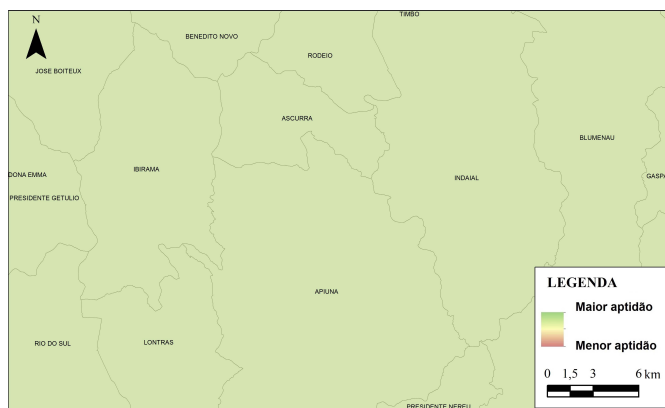
Fonte: SNUC, 2000

Figura 72: Camada - distanciamento de terras indígenas



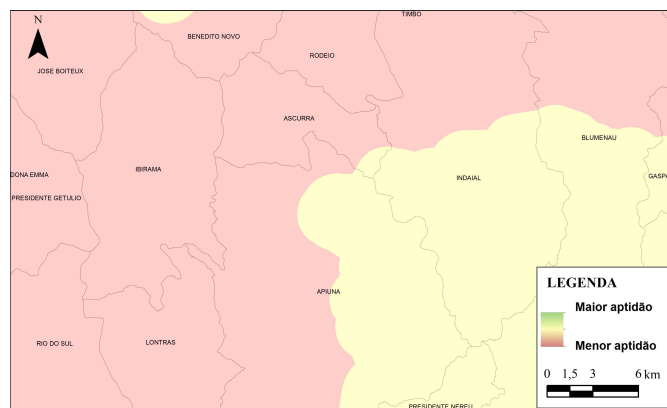
Fonte: FUNAI, 2011

Figura 73: Camada - distanciamento de terras quilombolas



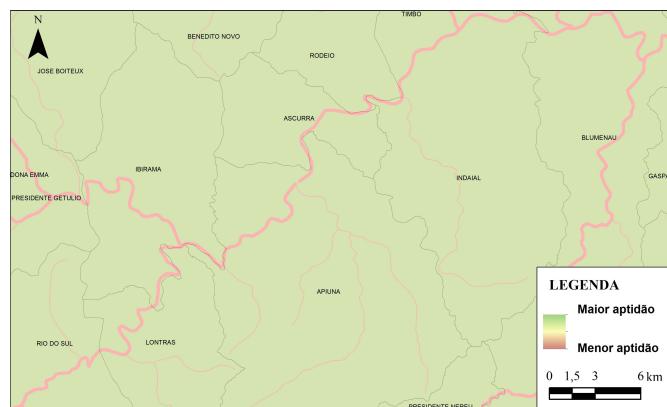
Fonte: INCRA, 2011

Figura 74: Camada - zona de amortecimento de unidade de conservação



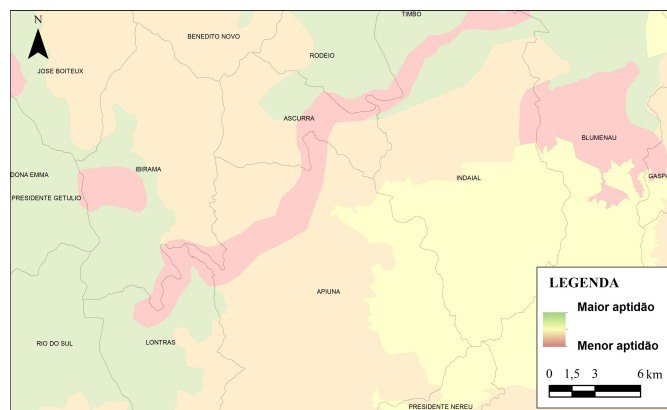
Fonte: IBAMA, 2011

Figura 75: Camada - área de preservação permanente



Fonte: BCIM, 2009

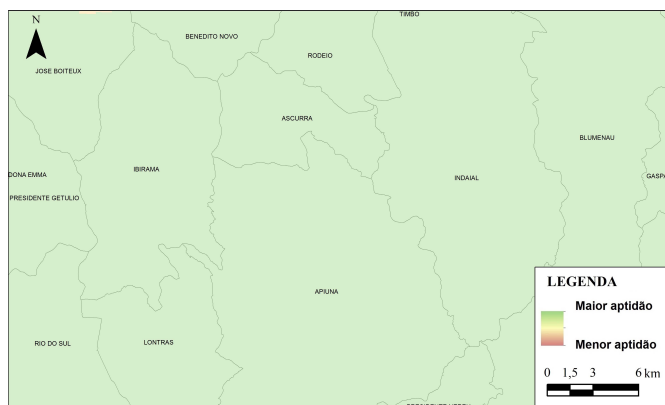
Figura 76: Camada - áreas prioritárias para conservação



Fonte: BCIM, 2009

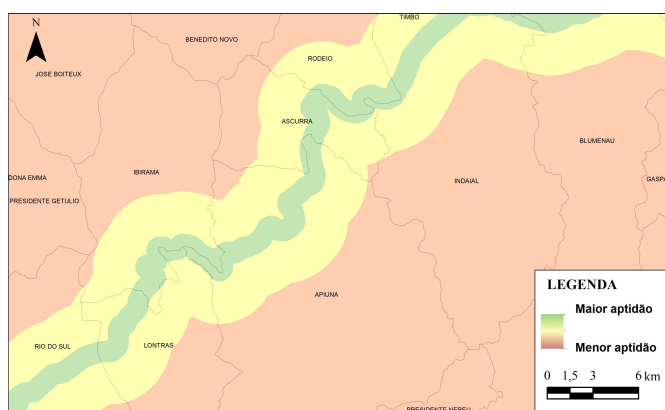


Figura 77: Camada - assentamento rural



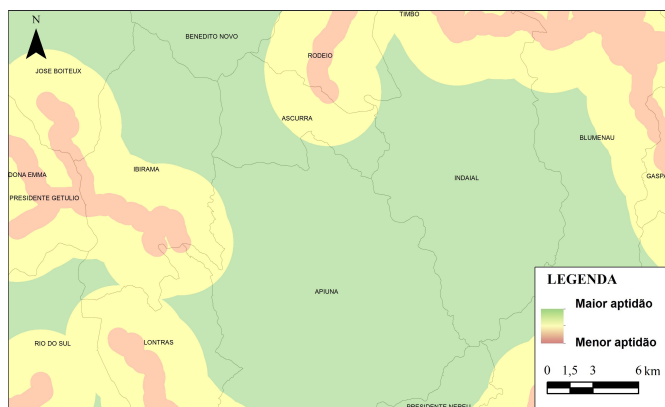
Fonte: INCRA, 2011

Figura 78: Camada - rodovias principais



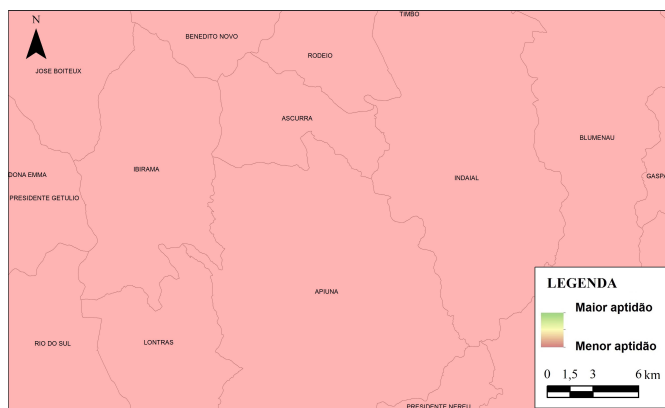
Fonte: DNIT, 2007

Figura 79: Camada - rodovias secundárias



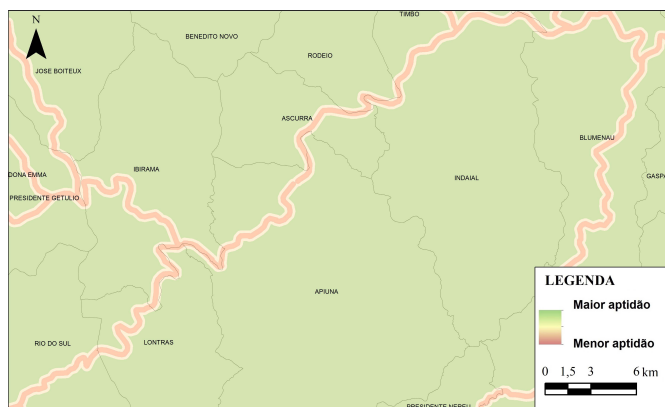
Fonte: DNIT, 2007

Figura 80: Camada - ferrovias



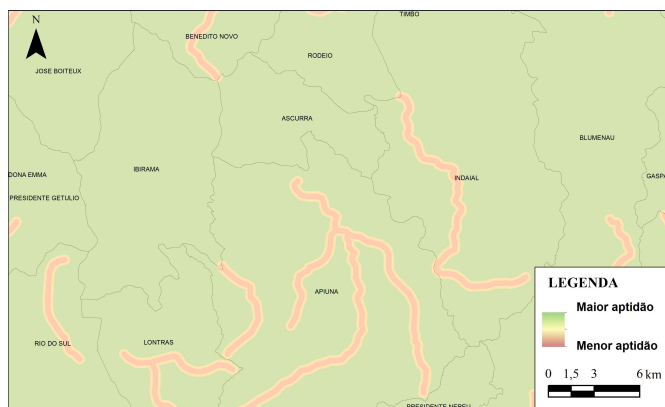
Fonte: ANTT, 2012

Figura 81: Camada - rios Principais



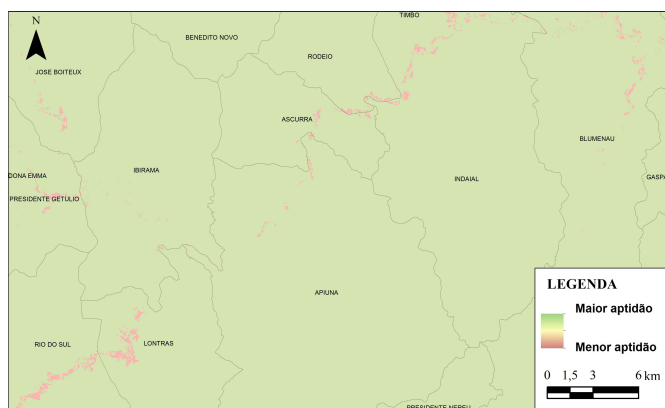
Fonte: BCIM, 2009

Figura 82: Camada - rios Secundários



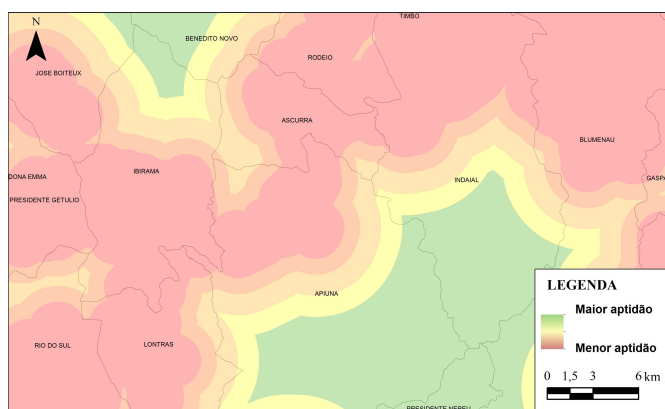
Fonte: BCIM, 2009

Figura 83: Camada - áreas inundáveis



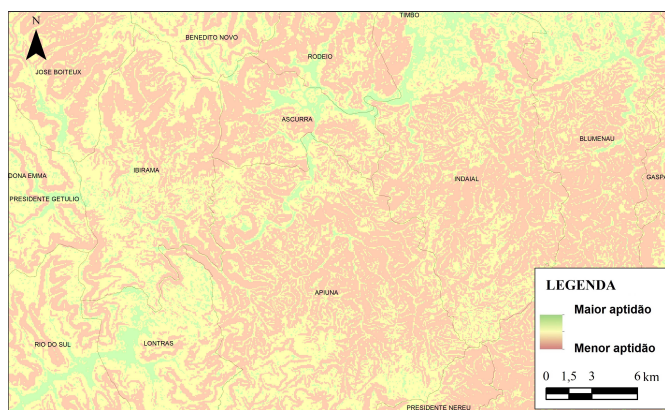
Fonte: BCIM, 2009

Figura 84: Camada - áreas Urbana



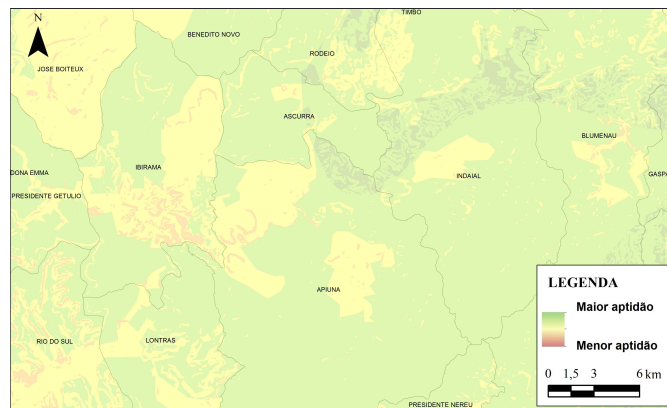
Fonte: IBGE, 2012

Figura 85: Camada - declividade



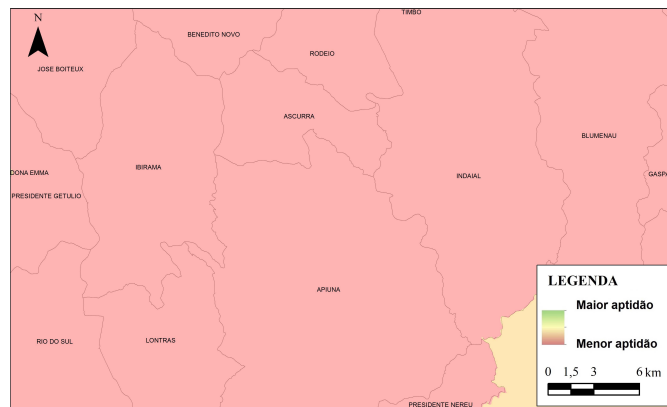
Fonte: EMBRAPA

Figura 86: Camada - geotécnica



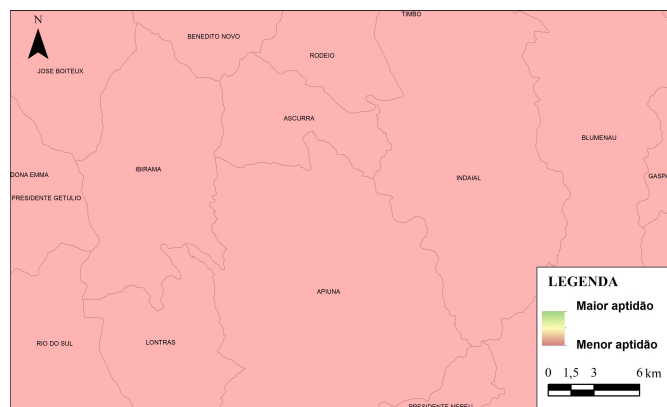
Fonte: IBGE, 2011

Figura 87: Camada - soja



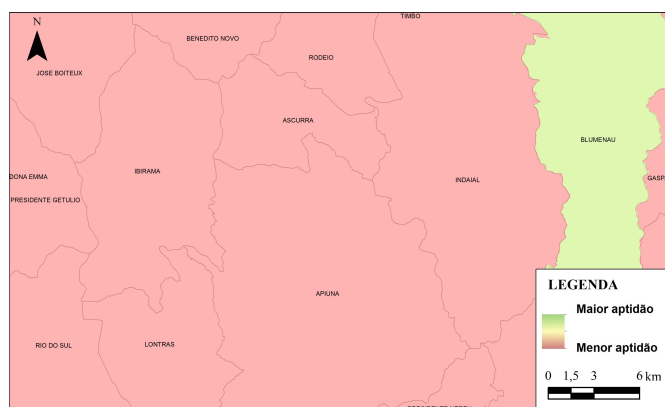
Fonte: IBGE, 2011

Figura 88: Camada - milho



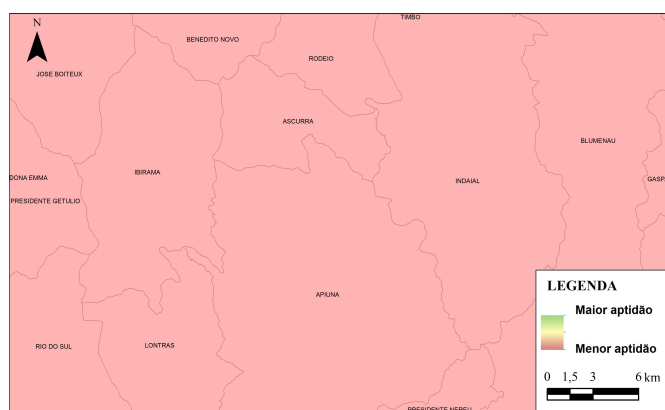
Fonte: IBGE, 2011

Figura 89: Camada - suínos



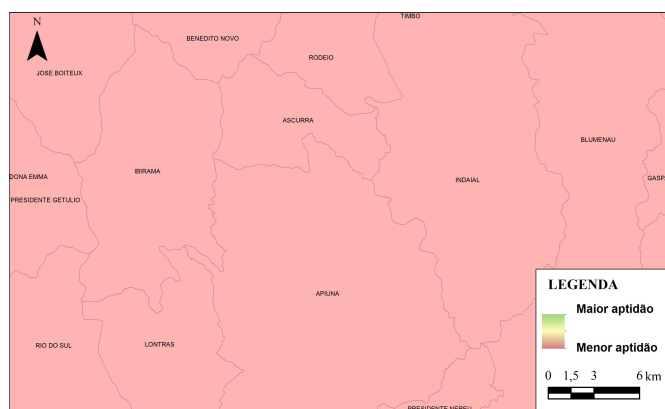
Fonte: IBGE, 2011

Figura 90: Camada - bovinos



Fonte: IBGE, 2011

Figura 91: Camada - galinhas



Fonte: IBGE, 2011